

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Профиль Электрооборудование летательных аппаратов

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Проектирование электропривода гироскопа с гистерезисным электродвигателем

УДК 629.051:531.383:621.313.13

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4Д	Юрьев Дмитрий Витальевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А. Г.	Д. Т. Н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н. Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин В. Ф.	Д. Т. Н., профессор		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютеева П. В.	К.Т.Н., доцент		

Томск, 2018 г.

Результаты обучения

по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

P1	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники.
P2	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях электроэнергетики и электротехники.
P3	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области электроэнергетики и электротехники.
P4	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
P5	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
P6	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области электроэнергетики и электротехники.
P7	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа электрических устройств, объектов и систем.
P8	Уметь формулировать задачи в области электроэнергетики и электротехники, анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
P9	Уметь проектировать электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.
P10	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники, интерпретировать данные и делать выводы.
P11	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетики и электротехники.
P12	Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической и электротехнической отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электрооборудование летательных аппаратов

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

(Подпись) _____ (Дата) Тютева П. В.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5Г4Д	Юрьев Дмитрий Витальевич

Тема работы:

Проектирование электропривода гироскопа с гистерезисным электродвигателем
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>	<p><i>Напряжение питания инвертора – 18 В, ток двигателя номинальный – 100 мА, максимальный – 700 мА, частота питания – 400 Гц.</i></p> <p><i>Параметры импульса намагничивания: фаза по напряжению переднего фронта – 90 – 120 эл. град, заднего фронта – 150 – 180 эл. град., кратность импульса перевозбуждения = $2U_{ном}$</i></p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<p><i>Аналитический обзор теории о синхронно-гистерезисном двигателе, устройстве импульсного намагничивания, перемещении материала ротора и требования к гиродвигателям</i></p>

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>		<i>Принципиальная схема устройства импульсного намагничивания</i>
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>		
Раздел	Консультант	
Социальная ответственность	Панин Владимир Филиппович	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Наталия Геннадьевна	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А. Г.	Д.Т.Н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4Д	Юрьев Дмитрий Витальевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г4Д	Юрьеву Дмитрию Витальевичу

Школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление подготовки	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:

- 1.1. вредных проявлений факторов производственной среды (метеословия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)
- 1.2. опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)
- 1.3. негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)
- 1.4. чрезвычайных ситуаций (техногенного, природного, экологического и социального характера)

Территория механического цеха с главным объектом рассмотрения исследования – электропривод гироприбора с гистерезисным электродвигателем. Необходимо поддержание:

- 1.1. Нормативных метеословий, уровней вибрации и шума;
- 1.2. Нормативных мер обеспечения электро- и пожаробезопасности.
- 1.3. Нормативных мер защиты окружающей среды от воздействия предприятия (механического цеха).
- 1.4. Нормативных мер по предотвращению вероятных ЧС и ликвидации их последствий.

2. Ознакомление и отбор законодательных и нормативных документов по теме и отбор их.

ГОСТ 12.0.003-74 «ОиВПФ»;
ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»;
ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности»;
ГОСТ 12.1.01290 «Вибрационная безопасность»;
ПУЭ, утвержденный министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.;
№123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008;
ГОСТ Р 50571.3-94 «Электроустановки зданий. Часть 4. Защита от поражения эл. током».
Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014) «Об организации сбора, вывоза, утилизации, и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования «Город Томск» ».

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:

Наиболее значимые вредные факторы:

1. Шум
2. Вибрации

<p>1.1.физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</p> <p>1.2.действие фактора на организм человека;</p> <p>1.3.приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</p> <p>1.4.предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</p>	<p>3. Недостаток естественного света</p> <p>4. Возможные ненормативные метеоусловия</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <p>2.1.механические опасности (источники, средства защиты);</p> <p>2.2.термические опасности (источники, средства защиты);</p> <p>2.3.Опасность электропоражения (в т.ч. статическое электричество, поражение молнией – источники, средства защиты);</p> <p>2.4.Опасность загораний (пожаров) (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</p>	<p>Наиболее вероятно воздействие на персонал следующих опасных факторов:</p> <p>1.Опасность электропоражения;</p> <p>2.Пожаровзрывоопасность.</p>
<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <p>3.1.анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</p> <p>3.2.анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</p> <p>3.3.анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</p>	<p>По п.3.1.:разработать или описать систему обращения с выбросами механического цеха.</p> <p>По п.3.2.: разработать или описать систему обращения со сбросами.</p> <p>По п.3.3. описать систему обращения с твердыми отходами цеха в соответствии с постановлениями Правительства РФ от 03.09.2010 №681 и Администрации г. Томска от 11.11 2009 №1110(с изменениями от 24.12. 2014г.).</p>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <p>4.1.перечень возможных ЧС на объекте;</p> <p>4.2.выбор наиболее типичных ЧС;</p> <p>4.3.разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</p>	<p>Одни из наиболее вероятных ЧС: пожары, электропоражения.</p> <p>Разработать мероприятия по предотвращению пожаров, электропоражений и других ЧС и ликвидации их последствий.</p>
Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	
<p>Специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.03.2018
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин Владимир Филиппович	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4Д	Юрьев Дмитрий Витальевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Г4Д	Юрьеву Дмитрию Витальевичу

Подразделение	ИШЭ	Отделение	НОЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Месячный оклад научного руководителя – 30000 руб. Месячный оклад инженера – 17000 руб
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент (Томск) – $k_p = 1.3$ Накладные расходы 200% от ФЗП
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления в социальные фонды 30 % от ФЗП

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Планирование работ и временная оценка их выполнения
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Смета затрат на проект
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Оценка технического уровня

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Г4Д	Юрьев Дмитрий Витальевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 94 с., 28 рис., 10 табл., 32 источников, прил. 1.

Ключевые слова: синхронно-гистерезисный двигатель, СГД, гироскоп, устройство импульсного намагничивания, проектирование, электропривод, перемещение, выпускная квалификационная работа, ВКР.

Объектом исследования является устройство импульсного намагничивания синхронно-гистерезисного двигателя.

Цель работы – проектирование устройства импульсного подмагничивания гистерезисного гидродвигателя для применения в составе гироскопа навигационных систем автономных объектов.

В процессе исследования проводились расчёт в программе MathCad 15, графическое проектирование в КОМПАС-3D, обработка графических материалов в программе Microsoft Visio.

В результате исследования разработана система управления устройства импульсного подмагничивания.

Основные технико-эксплуатационные характеристики: Напряжение питания инвертора, ток двигателя номинальный, максимальный ток, частота питания, фаза по напряжению переднего фронта, фаза по напряжению заднего фронта, кратность импульса перевозбуждения.

Степень внедрения: ВКР выполнена по заданию отделения «Электроэнергетики и электротехники»

Область применения: навигационные системы автономных объектов.

Содержание

Введение	11
1. Синхронно-гистерезисный двигатель	13
1.1. Принцип действия синхронно-гистерезисного двигателя	13
1.2. Перевозбуждение синхронно-гистерезисного двигателя	17
1.3. Устройство импульсного намагничивания	24
2. Применение синхронно-гистерезисных двигателей в гироскопических приборах	38
2.1. Свойства гироскопа, которые определяют его применение	38
2.2. Влияние гиродвигателя на точность прибора.....	40
2.3. Требования к гиродвигателям и пути их обеспечения	52
3. Расчёт устройства импульсного намагничивания	58
3.1. Расчёт трансформатора	59
3.2. Выбор силовых ключей	62
3.3. Выбор драйверов	63
3.4. Разработка системы управления устройства импульсного намагничивания.....	64
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	65
4.1. Планирование работ и оценка времени выполнения	66
4.2. Смета затрат на проектирование	68
4.2.1. Материальные затраты.....	68
4.2.2. Амортизация вычислительной техники	68
4.2.3. Основная заработная плата исполнителей.....	69
4.2.4. Затраты на социальные нужды	70
4.2.5. Прочие затраты.....	70
4.2.6. Накладные расходы.....	71
4.3. Оценка технического уровня	72
5. Социальная ответственность	75
5.1. Анализ вредных факторов	76
5.1.1. Шум.....	77
5.1.2. Вибрация.....	78
5.1.3. Недостаток естественного света.....	79
5.1.4. Микроклимат	81

5.2. Анализ опасных факторов	83
5.2.1. Электропоражение	84
5.2.2. Загорание (пожар)	85
5.3. Защита окружающей среды	86
5.4. Предотвращение ЧС и устранение их последствий	87
5.4.1. Загорание (пожар) как источник ЧС	88
5.4.2. Электропоражение как источник ЧС	89
Заключение	91
Список использованной литературы.....	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Принципиальная схема устройства импульсного намагничивания.....	95

Введение

Прогресс технологии электронных компонентов, которые составляют костяк силовой электроники и микропроцессорной техники, а также совершенствование методов управления электромеханическими и полупроводниковыми преобразователями послужили причиной их естественной интеграции в единый электромеханический интеллектуальный модуль. При наличии дополнительных механических компонентов такой электромеханический модуль на самом деле является электроприводом, или, в современном понимании – мехатронная система, основанной на идее взаимосвязи механических, электронных и вычислительных элементов.

Качественная работа современных мехатронных систем обеспечивается включенными в них статическими преобразователями с автономными инверторами напряжения или тока и микропроцессорными устройствами. В зависимости от требований конкретного технологического процесса или приводимого в движение механизма статический преобразователь позволяет организовать для электрических машин практически любые законы изменения напряжения и частоты статора, а также скорости и углового положения ротора.

Применение любого электродвигателя в составе электропривода для решения тех или иных задач предполагает знание не только его регулировочных возможностей, но и особенностей приводимых в движение механизмов и выполняемых ими технологических операций. Для электропривода спец. назначения, например гироскопических, используемых в инерциальных системах навигации; «технологических», используемых в ультрацентрифугах для разделения изотопов тяжёлых элементов; электроверетен и т. п., это тем более важно, т. к. в их структуре двигатель, как правило, объединяется конструктивно с инерционным механизмом – гиромаховиком, веретеном или полностью с ультрацентрифуги. От режимов же работы двигателя зависит качество выполнения задач, стоящих перед электроприводом в конкретном технологическом процессе.

В ряде электроприводов спец. назначения удачное применение нашёл синхронно-гистерезисный двигатель, принцип работы и регулировочные возможности которого удачно сочетаются с требованиями соответствующих технологическому процессу. Регулирование синхронно-гистерезисного двигателя с помощью современных полупроводниковых устройств возможно не только по частоте и напряжению, но и по намагниченности ротора. Именно способность гистерезисного материала ротора к перемагничиванию со стороны обмоток статора наделяет синхронно-гистерезисный двигатель не только возможностью самозапуска при любом моменте инерции приводимого в движение механизма, но и получения шагового режима, сверхнизких скольжений и демпфирования колебаний скорости ротора, работы с различным коэффициентами мощности.

Целью данной работы является проектирование устройства электропривода гиросприбора с импульсным подмагничиванием гистерезисного гидродвигателя для применения в навигационных системах автономных объектов.

Для достижения поставленной цели нужно решить ряд задач:

- Провести обзор литературы по теме синхронно-гистерезисного гиросприбора;
- Подобрать оптимальную схему устройства импульсного подмагничивания;
- Рассчитать устройство импульсного подмагничивания;
- Рассмотреть условия труда при производстве в соответствии с нормативными документами и экологической безопасностью.

1. Синхронно-гистерезисный двигатель

1.1. Принцип действия синхронно-гистерезисного двигателя

«Синхронно-гистерезисный двигатель – это синхронный двигатель, у которого вращающий момент создаётся за счёт явления гистерезиса при перемагничивании ферромагнитного материала ротора».

Данный двигатель имеет следующие достоинства:

- Независимость нагрузки при наличии некоторого запаса по моменту и частоты вращения ротора от изменения напряжения в сети;
- Плавный вход в синхронизм при любом моменте инерции ротора и наличие пускового момента;
- Высокая надежность и простота конструкции.

Благодаря этим достоинствам, синхронные гистерезисные двигатели получили распространение в гироскопических приборах систем навигации автономных объектов [1] и многодвигательных высокоскоростных технологических линиях по разделению изотопов тяжёлых элементов, где по условиям качественного рабочего процесса необходимо непосредственное соединение двигателя и инерционного механизма или их полное совмещение при отсутствии доступа к валу. Скорость таких механизмов достигает значений до 10^5 об/мин. К тому же, синхронно-гистерезисный двигатель применяется в устройствах записи, воспроизведения звука и изображения [2], где используются для вращения дисков магнитофонов, магнитных головок видеоманитофонов, в фототелеграфных устройствах.

Основные недостатки синхронно-гистерезисного двигателя: низкие энергетические показатели (КПД, $\cos\varphi$) и склонность к колебаниям ротора. Эффективный путь их устранения – применение способов и устройств намагничивания материала ротора [3]. На этом пути магнитная «податливость» ротора воздействию со стороны статора может явиться хорошим помощником в создании новых способов и устройств управления синхронно-гистерезисного двигателя.

Статор синхронно-гистерезисного двигателя аналогичен статору асинхронного двигателя, а ротор представляет собой кольца, изготовленные из относительно магнитотвердого материала типа викаллой, который насажен на втулку из немагнитного или магнитомягкого материала (рис. 1.1).

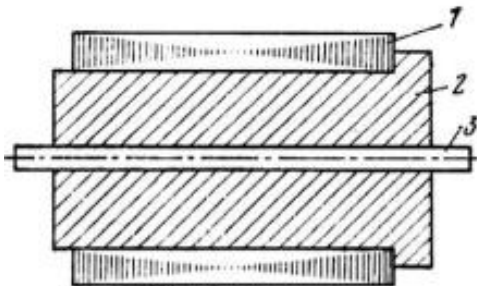


Рисунок 1.1 – Ротор СГД:

1 – кольцо из магнитотвердого материала; 2 – немагнитная или магнитомягкая втулка; 3 – вал

В некоторых случаях втулка отсутствует и активный слой насаживается непосредственно на вал. Также существует и торцевое исполнение синхронно-гистерезисного двигателя, где ротор выполнен в виде диска. Особенность материала ротора состоит в том, что он по магнитным свойствам (коэрцитивной силе и остаточной индукции) занимает промежуточное положение между магнитомягкими сталями с узкой петлёй гистерезиса, применяемыми в сердечниках постоянных магнитов. Т. о., материал ротора можно намагнить или перемагнитить с помощью магнитодвижущей силы обмотки статора.

Принцип работы синхронно-гистерезисного двигателя заключается в следующем: при включении гистерезисного двигателя в сеть переменного тока обмоткой статора создаётся вращающееся магнитное поле (рис. 1.2).

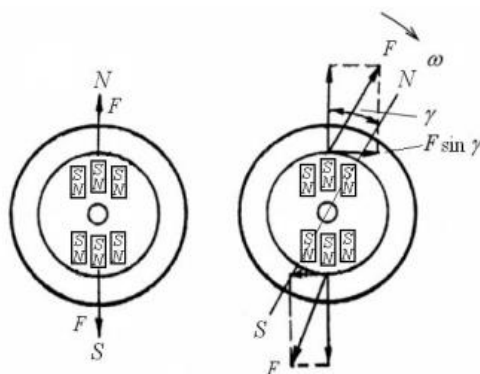


Рисунок 1.2 – Возникновение электромагнитного момента синхронно-гистерезисного двигателя

Сначала под действием этого поля домены активного материала ротора, изначально находившиеся в беспорядочном положении, начинают выстраиваться соответственно действующему на них магнитному полю статора – возникает собственная намагниченность ротора. При повороте поля статора наведенные в роторе полюса отстают от него за счёт сил межкристаллического доменного трения. Лишь при повороте поля статора относительно неподвижного тела ротора на определённый угол γ , домены преодолевают межкристаллические силы трения, «срываясь» со своих мест, и в дальнейшем следуют, не отставая за вращающимся полем и увлекая за собой тело ротора. Магнитное доменное запаздывание носит название «явление гистерезиса», поэтому подобный синхронный двигатель и получил название «гистерезисный». В результате возникающей тангенциальной составляющей силы взаимодействия между статором и ротором образуется гистерезисный момент:

$$M = c \cdot \Phi_p \cdot F \cdot \sin \gamma$$

где Φ_p и F – соответственно поток, обусловленный намагниченностью ротора, и МДС статора; c – постоянный коэффициент.

Вне зависимости от момента инерции нагрузки ротор будет ускоряться и при достижении синхронной скорости поля статора «войдёт в синхронизм». Далее он будет работать как обычная синхронная машина. При этом

гистерезисный угол γ приобретает смысл угла нагрузки, однако его максимальное значение в 2-3 раза меньше максимального значения угла ($\pi/2$) неявнополюсного синхронного двигателя. Т. о., синхронно-гистерезисный двигатель развивает вращающий момент единой «синхронной природы» как при асинхронной, так и при синхронной угловой скорости вращения ротора, причём величина пускового момента, в отличие от асинхронного двигателя, не зависит от скорости вращения ротора. На рис. 1.3 представлен вид механической характеристики СГД.

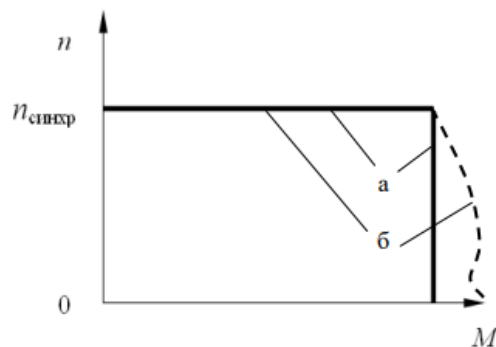


Рисунок 1.3 – Механическая характеристика идеального (а) и реального (б) синхронно-гистерезисного двигателя

В отличие от идеального синхронно-гистерезисного двигателя (а) у реального на механической характеристике присутствует асинхронный участок (б) за счёт момента от вихревых токов.

1.2. Перевозбуждение синхронно-гистерезисного двигателя

Энергетические показатели гистерезисного двигателя не особенно хороши, так как магнитный поток ротора является вторичным, то есть он наведен рабочим магнитным потоком статора. Режим работы этого двигателя аналогичен режиму синхронной машины с недовозбуждением. Однако существует возможность увеличения намагниченности ротора, при этом двигатель входит в режим перевозбуждения. Этот режим осуществляется путем цикла «повышение – снижение» напряжения питания. Рис. 1.4 поясняет процесс перевозбуждения синхронно-гистерезисного двигателя.

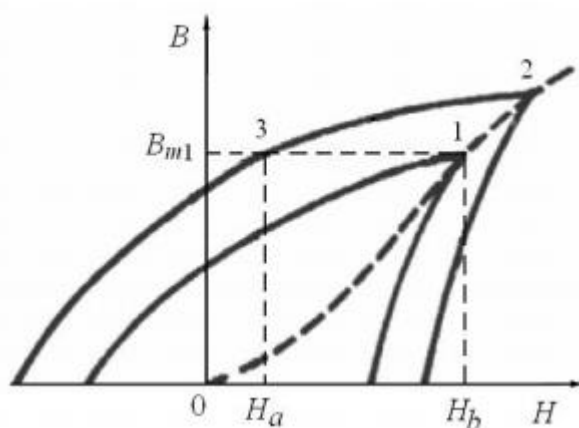


Рисунок 1.4 – Процесс перевозбуждения синхронно-гистерезисного двигателя

Пусть в исходном состоянии рабочий режим материала ротора характеризовался петлей гистерезиса с рабочей точкой 1, соответствующей индукции B_{m1} и напряжённости поля H_b . При увеличении напряжения питания рабочая точка перемещается по основной кривой намагничивания в положение 2, а при последующем снижении напряжения занимает положение 3. При этом конечная точка 3 характеризуется той же индукцией, но существенно меньшей напряжённостью поля H . Это говорит о том, что ротор синхронно-гистерезисного двигателя, получив увеличенную намагниченность, больше не нуждается в большей величине намагничивающего тока статора. Следовательно, после проведения подобного

цикла существенно падает реактивный ток двигателя, потребляемый из сети, потери в активном сопротивлении статора и увеличивается перегрузочная способность двигателя.

В процессе запуска, когда ротор вращается со скоростью, которая меньше поля статора, материал ротора перемагничивается и в нем образуются потери, которые пропорциональны скольжению:

$$P_f = P_{r0} \cdot f_1 \cdot s \cdot V_p,$$

где P_{r0} – удельные гистерезисные потери, которые выделяются за цикл перемагничивания в единице объёма материала ротора при данной индукции в нём; f_1 – частота вращающегося поля статора; s – скольжение; V_p – объём гистерезисного материала ротора.

При этом механическая мощность и момент двигателя выражаются соответственно следующим образом:

$$P_2 = P_{эм} - P_f = P_{r0} \cdot f_1 \cdot V_p - P_{r0} \cdot f_1 \cdot s \cdot V_p = P_{r0} \cdot f_1 \cdot (1-s) \cdot V_p,$$

где $P_{эм}$ – электромагнитная мощность:

$$M = P_2 / \omega_2 = p \cdot P_{r0} \cdot V_p / 2\pi,$$

где $\omega_2 = 2\pi f_1(1-s)/p$ – угловая скорость вращения ротора; p – число пар полюсов.

Удельные гистерезисные потери P_{r0} пропорциональны площади петли гистерезиса и определяются через индукцию и напряженность поля в роторе:

$$P_{r0} = \oint B dH.$$

Форма петли гистерезиса определяет закон изменения во времени и пространстве напряженности магнитного поля в любой точке активного материала ротора при заданном законе изменения индукции в этой точке. Значение угла γ также определяется формой петли гистерезиса (рис. 1.5).

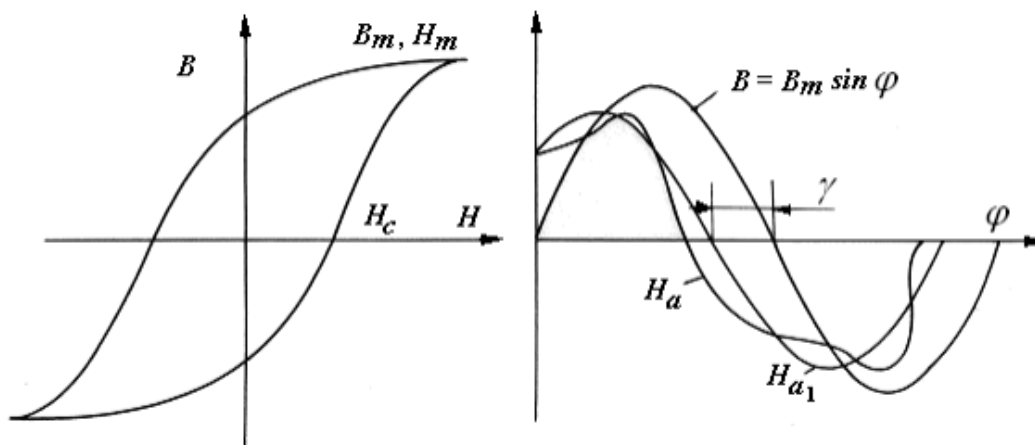


Рисунок 1.5 – К определению гистерезисного узла

Поскольку момент в двигателе определяется взаимодействием первых гармонических составляющих двигателя, то и угол γ следует определить как угол между первыми гармониками индукции B и напряженности H_{a1} поля ротора. Магнитотвёрдые материалы характеризуются нелинейностью характеристик, поэтому при синусоидальном характере $B(t)$ несинусоидальной является $H(t)$ и наоборот. К тому же, напряженность и индукция содержат высшие пространственные гармонические ввиду специфики конструктивного исполнения обмотки двигателя.

Поговорим о намагничивании в асинхронном и синхронном режимах. При первоначальном включении синхронно-гистерезисного двигателя в сеть (принимая, что материал ротора изначально полностью размагничен) материал ротора намагничивается и перемагничивается. При это рабочая точка (для каждой малой области материала ротора) в координатах B - H совершает движение в соответствии с рис. 1.6. При несимметричном изменении напряжённости поля на периоде имеет случай несимметричное перемагничивание (рис. 1.6 б, точки 1-4) или несимметричное по частным циклам (1.6 в, точки 1-6) [3].

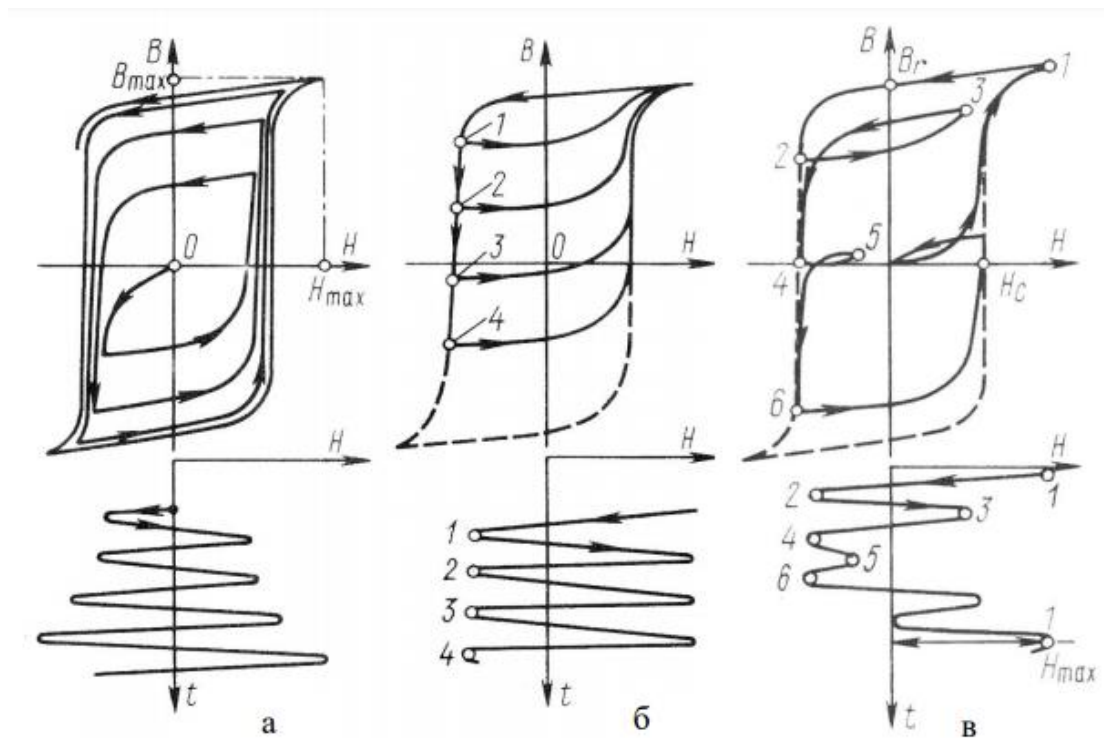


Рисунок 1.6 – К намагничиванию материала ротора синхронно-гистерезисного двигателя

По мере разгона ротора его частота перемагничивания падает и становится равной нулю при вхождении двигателя в синхронизм. При этом ротор занимает положение в соответствии с моментом нагрузки, а элементарные области материала ротора принимают значения B и H в соответствии с петлёй «распределения», которая в начальный момент входа в синхронизм соответствует петле перемагничивания и характеризует магнитное состояние точек ротора по полюсному делению. При моменте нагрузки, меньшем пускового, ротор стремится занять положение ближе к продольному, то есть в соответствии с положением МДС статора, в пределе (при XX) совпадая с ним. При этом магнитное состояние точек ротора изменяется в соответствии с траекториями намагничивания и размагничивания, причём у одних точек ротора наблюдается увеличение напряжённости поля, у других – падение. При XX двигателя петля распределения превращается в бестелесную кривую, подобную кривой первоначального намагничивания (рис. 1.7).

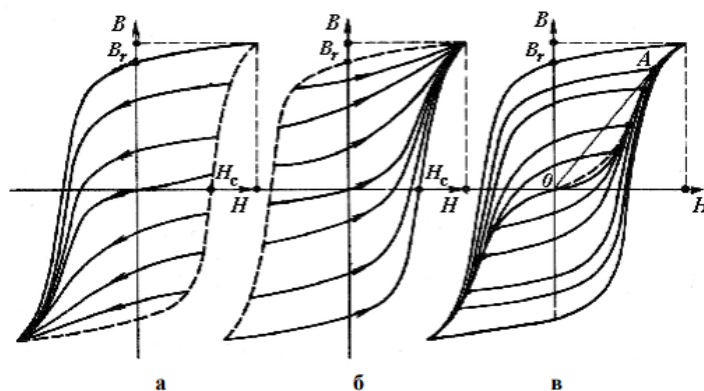


Рисунок 1.7 – Кривые намагничивания (а), размагничивания (б) и перемагничивания (в) гистерезисного материала

При намагничивании же размагниченного ротора, неподвижного относительно поля статора, точки ротора намагнитятся также в соответствии с первоначальной кривой намагничивания, несколько отличающейся от кривой намагничивания в предыдущем случае. При повороте такого ротора на некоторый угол относительно поля статора состояние точек ротора также изменяется в соответствии с траекториями намагничивания и размагничивания, причём чем больше угол поворота ротора, тем шире петля распределения (рис. 1.8, движение точек «а-к») [3].

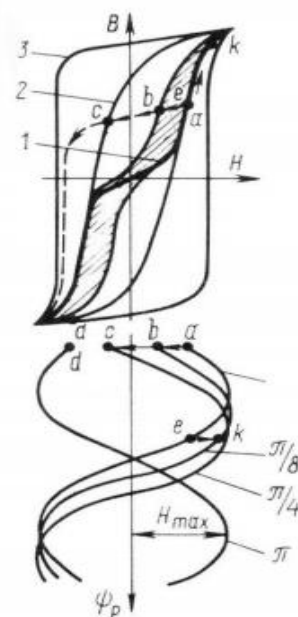


Рисунок 1.8 – Кривые распределения поля при повороте ротора относительно поля статора

При выключении двигателя наступает режим генератора, напряженность поля в зазоре меняет знак, и ротор размагничивается до некоторого конечного состояния в соответствии с траекториями размагничивания материала. Остаточная электродвижущая сила при этом определяется способом намагничивания ротора. Если намагничивание было произведено вращающимся полем статора и точки ротора выходили на петлю распределения, то электродвижущая сила при отключении будет выше, чем в случае намагничивания полем статора, неподвижным относительно поля ротора.

Кроме того, на особенности намагничивания ротора влияет его конструкция. Изначально процесс намагничивания ротора в синхронно-гистерезисном двигателе связан с понятием «вращающееся магнитное поля» и «вращательный гистерезис», в отличие от линейного перемагничивания материала. Если ротор синхронно-гистерезисного двигателя выполнен из сплошного гистерезисного материала, то в нём присутствует вращательное перемагничивание. В общем случае эллиптического перемагничивания материала вводится коэффициент эллипсности как отношение тангенциальной и радиальной составляющих индукции $k_{\varepsilon} = B_{\tau} / B_{\rho}$. Исследования показали, что явления гистерезиса при вращательном перемагничивании и линейном принципиально отличаются (рис. 1.9) [4].

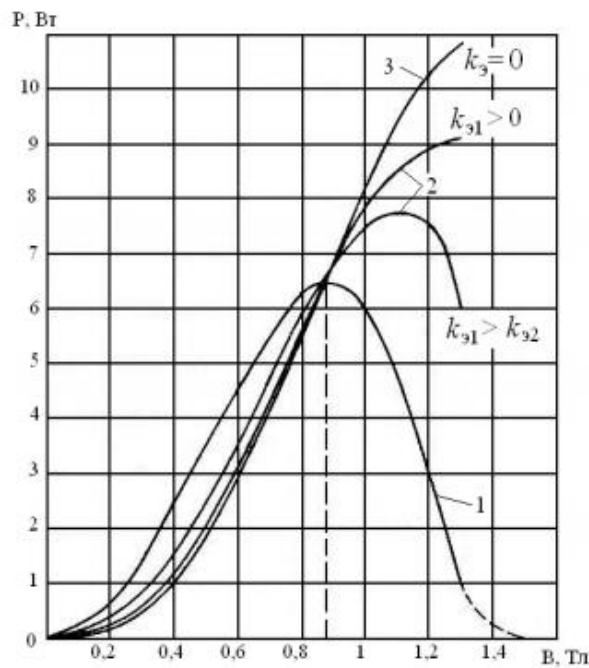


Рисунок 1.9 – Зависимость потерь на гистерезис от индукции при круговом (1), эллиптическом (2) и линейном (3) перемагничивании материала ротора

Если ротор тонкий и насажен на немагнитную втулку, то в нем круговое перемагничивание вырождается в тангенциальное линейное. При магнитной втулке - радиальное линейное перемагничивание.

Т. о., результат намагничивания материала ротора зависит от режима намагничивания, предыстории его магнитного состояния и конструкции. В общем случае процесс намагничивания сложен, не описывается математическими выражениями общего вида, а попытки моделирования режимов работы синхронно-гистерезисного двигателя, тем более при периодическом импульсном намагничивании материала ротора, дают невысокие точности [5].

1.3. Устройство импульсного намагничивания

Для улучшения энергетических показателей синхронно-гистерезисного двигателя используют устройства намагничивания материала ротора, осуществляющие цикл «увеличение – уменьшение» напряжения питания двигателя. Для намагничивания материала ротора достаточно сформировать напряжение в виде импульса, продолжительностью около 0,1 – 0,2 периода питающего напряжения. При периодическом формировании импульсов намагничивания с частотой в 10 – 20 раз ниже частоты питающего напряжения имеет место эффективное демпфирование колебаний угла нагрузки (скорости), присущего синхронно-гистерезисного двигателя. Кроме эффекта демпфирования и стабилизации магнитного состояния ротора, можно достичь эффекта сверхнизкого скольжения ротора [6].

Устройства импульсного намагничивания в зависимости от схемы могут использоваться в гистерезисном электроприводе как самостоятельно, вне зависимости от выполнения первичного источника питания (сеть, автономный инвертор напряжения или тока), так и только в составе источника питания – автономного инвертора, как его неотъемлемая часть. В любом случае они выполняются в виде самостоятельных схем – блоков импульсного намагничивания. Также, в гистерезисном электроприводе часто применяется форсированный запуск при увеличении напряжения питания двигателя до двух раз. При вхождении в синхронизм напряжение падает, и, фактически, реализуется эффект перевозбуждения. В этом случае блок импульсного намагничивания может выполнять функции форсирования напряжения.

Существует большое количество схем гистерезисных электроприводов с импульсным намагничиванием, которые отличаются вариациями соединения импульсного и основного источников. При проектировании блоков импульсного намагничивания нужно так выбирать алгоритмы управления ими, чтобы, выполняя задачу повышения энергетических показателей синхронно-гистерезисного двигателя, не внести дополнительных возмущений по моменту и скорости синхронно-гистерезисного двигателя,

если это не требуется по каким-либо другим соображениям. Предпосылкой для выбора подобных алгоритмов должны являться правильные представления об относительном пространственном расположении векторов намагничивающих сил фазных обмоток синхронно-гистерезисного двигателя от основного источника питания, векторов намагничивающих сил этих же обмоток от блока импульсного намагничивания и вектора намагниченности ротора.

На рис. 1.10 представлена одна из схем, которая позволяет производить форсированный пуск синхронно-гистерезисного двигателя с последующим перевозбуждением или, в принципе, формировать импульсы напряжения на двигателе в процессе его работы.

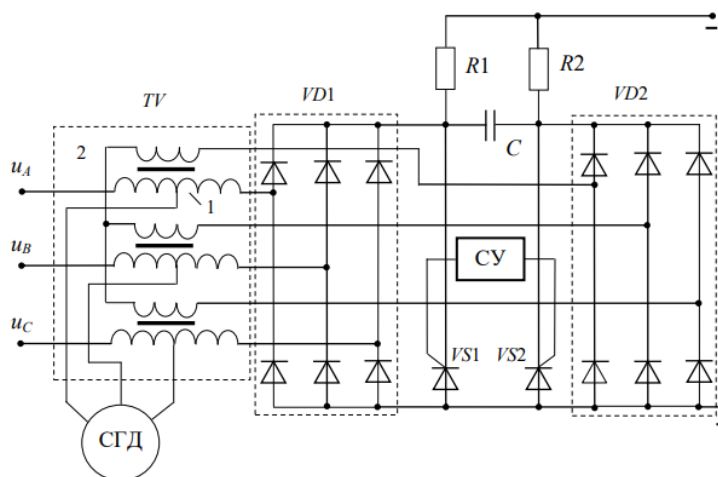


Рисунок 1.10 – Устройство намагничивания синхронно-гистерезисного двигателя с автотрансформатором (СУ – система управления)

Принцип работы УИН СГД с автотрансформатором: оно выполнено в виде трёхфазного трансформатора с первичной и вторичной обмотками (ПО и ВО) трансформатора. ПО имеет отпайки, к которым может подключаться либо двигатель, либо напряжение сети. Концы фаз ПО и ВО трансформатора подключены соответственно через выпрямители к бесконтактным тиристорным ключам. При подключении синхронно-гистерезисного двигателя к отпайкам ПО его запуск происходит при включенном тиристоре VS2 и выключенном VS1. При этом синхронно-гистерезисный двигатель

подключён на полное напряжение сети, а трансформатор работает в режиме ТТ. При прекращении запуска тиристор VS1 включается, а тиристор VS2 выключается, напряжение на двигателе резко падает, т.к. оно определяется работой трансформатора в режиме понижающего автотрансформатора.

В том случае, если напряжение сети подведено к отпайкам ПО, а синхронно-гистерезисный двигатель подключён к сетевым контактам, пуск производится при включенном тиристоре VS1 и выключенном VS2, а трансформатор работает в качестве повышающего автотрансформатора. После окончания пуска происходит обратное переключение тиристорных ключей, и напряжение на синхронно-гистерезисных двигателях падает до напряжения сети.

На рис. 1.11 изображена схема блока импульсного намагничивания на основе нулевого инвертора напряжения, используемого в качестве вольтодобавки.

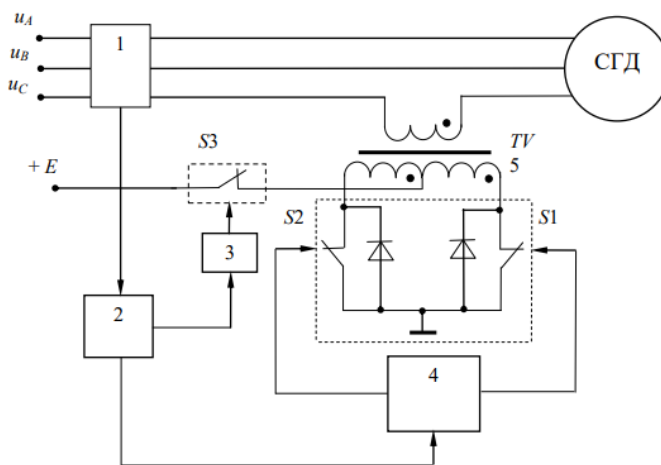


Рисунок 1.11 – Реализация БИН на основе нулевого инвертора в фазе синхронно-гистерезисного двигателя

Принцип работы БИН на основе нулевого инвертора в фазе СГД: При отсутствии импульса намагничивания полупроводниковые ключи S1 и S2 замкнуты, а ключ S3 разомкнут и трансформатор работает как трансформатор тока закороченной ВО. При формировании импульса намагничивания посредством схем управления периодически замыкается полупроводниковый

ключ $S3$ и размыкается один из ключей $S1$ или $S2$. Т. о., на выходной обмотке трансформатора образуется двуполярное выходное импульсное напряжение, которое суммируется с напряжением питания синхронно-гистерезисного двигателя, поступающим от сети. При этом нет одностороннего подмагничивания статора синхронно-гистерезисного двигателя. Импульсы намагничивания формируются по фазе и длительности в блоке 2, которые синхронизируются с напряжением сети через датчики блока 1.

Достоинство: при вероятном выходе из строя п/п ключей блок импульсного намагничивания не нарушается целостность фазных проводников синхронно-гистерезисного двигателя. Источник постоянного тока может быть как дополнительным, так и основным – от звена постоянного тока автономного инвертора, поскольку может иметь общую точку с общей шиной постоянного тока статического преобразователя. К тому же такой блок импульсного намагничивания способен работать с любым основным источником питания – автономными инверторами напряжения или тока, генератором или промышленной сетью.

На рис. 1.12 представлены варианты реализации бестрансформаторных схем импульсного намагничивания на выходе основного источника – автономного инвертора или сети [3].

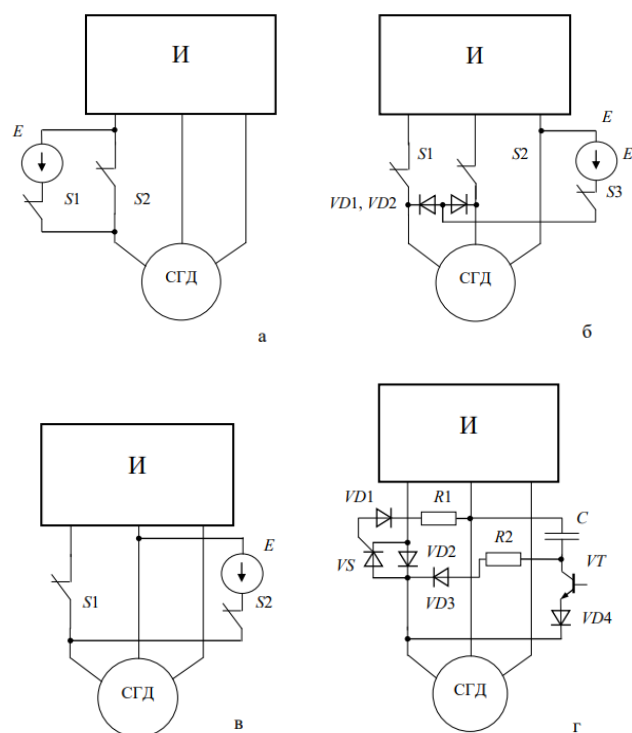


Рисунок 1.12 – Бестрансформаторные варианты схем импульсного намагничивания на выходе основного источника питания

Схема на рис. 1.12а формирует импульс намагничивания при размыкании ключи S2 и замыкании S1. Недостаток: необходимость пропускания импульсного тока через основной источник.

Этим недостатком не обладает схема на рис. 1.12б. В момент формирования импульса намагничивания ключи S1, S2 отключают основной источник питания, и ток импульсного источника замыкается только через фазы СГД.

Схема на рис. 1.12в является частным случаем предыдущей схемы.

На рис. 1.12г представлен вариант практической реализации схемы рис 3в. БИН содержит последовательный ключ переменного тока, который выполнен на тиристоре VS и диодах VD1 и VD2. Роль импульсного источника выполняет конденсатор с цепью заряда R2 – VD3. Работа транзисторного ключа VT синхронизирована с работой ключей инвертора И. В исходном состоянии транзисторный ключ выключен, ключ на тиристоре VS и диодах

VD1 и VD2 включен. При формировании импульса намагничивания включается транзистор и выключается тиристор.

Общим недостатком схем рис. 1.12 является наличие большого количества полупроводниковых ключей в цепях питания синхронно-гистерезисного двигателя.

На рис. 1.13 представлена схема гистерезисного электропривода с блоком импульсного подмагничивания в виде вольтодобавочного инвертора И1, расположенного в цепи постоянного тока основного инвертора И2 и способного выполнять функцию форсажа при запуске синхронно-гистерезисного двигателя.

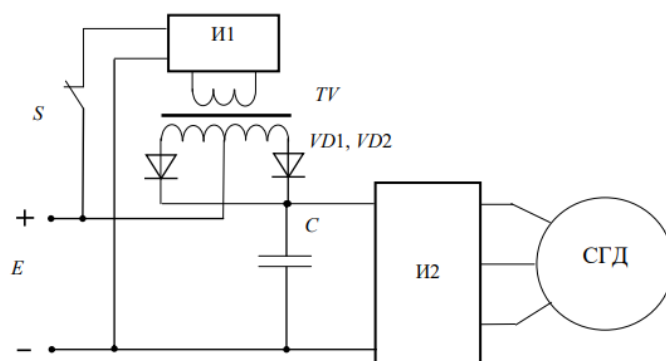


Рисунок 1.13 – БИН с дополнительным вольтодобавочным инвертором в цепи постоянного тока основного инвертора

Она формирует повышенное напряжение на входе основного инвертора при замыкании переключателя схема формирует повышенное напряжение на входе основного инвертора при замыкании переключателя $S1$. К тому же, в данной схеме из-за наличия компенсирующего конденсатора на входе основного инвертора затруднено формирование узких импульсов намагничивания [3].

На рис. 1.14 приведены ряд схем импульсного намагничивания синхронно-гистерезисного двигателя, использующих реактивную энергию, циркулирующую в инверторном электроприводе.

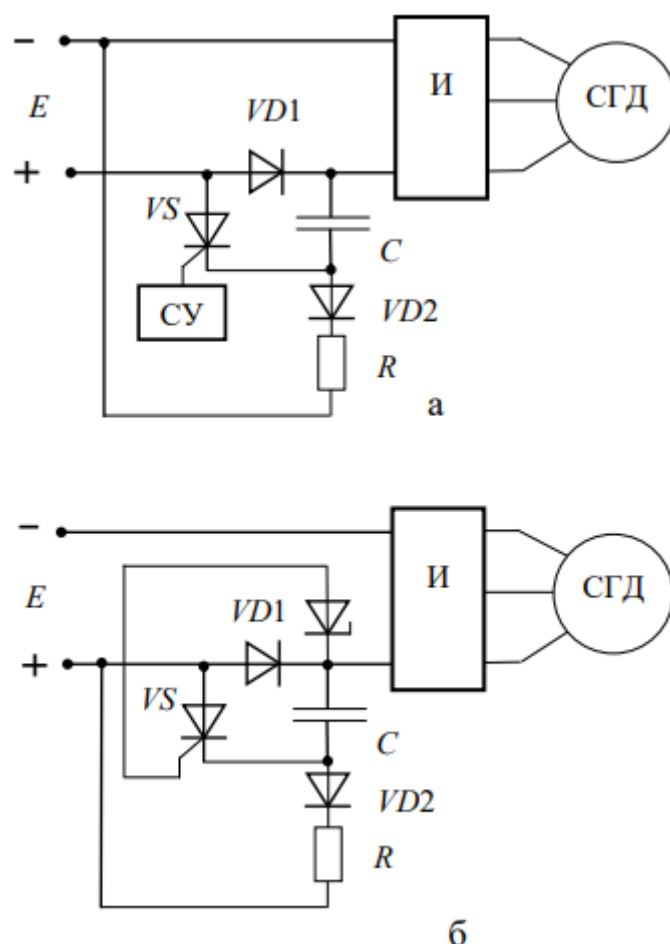


Рисунок 1.14 – Схему импульсного намагничивания, использующие реактивную энергию синхронно-гистерезисного двигателя

В процессе работы в гистерезисном электроприводе циркулирует реактивная энергия. Источником этой энергии является слабо возбужденный синхронно-гистерезисный двигатель при коэффициенте мощности $< 0,528$, а также резкие фронты переключения ключей инвертора. При этом в схеме рис. 1.14а конденсатор заряжается реактивным током через диод VD2 и резистор R. С некоторой периодичностью по сигналам схемы управления открывается тиристор VS, и конденсатор оказывается подключенным последовательно с основным источником постоянного тока E. В схеме рис. 1.14б заряд конденсатора осуществляется через источник E, который в этом случае должен обладать проводимостью по переменному току. При превышении напряжения на стабилитроне некоторого критического значения происходит его пробой, открывается тиристор и, как в предыдущей схеме, конденсатор

оказывается подключенным последовательно с основным источником постоянного тока E . После разряда конденсатора в обеих схемах, синхронно-гистерезисный двигатель перевозбуждается. При этом увеличивается его $\cos\varphi$ и прекращается циркуляция реактивной энергии через инвертор. При потере двигателем дополнительной намагниченности процесс снова повторяется.

Недостаток: при формировании импульса намагничивания ток протекает по цепи основного источника питания, образуя нежелательные пульсации напряжения. Схема на рис. 1.15 лишён этого недостатка.

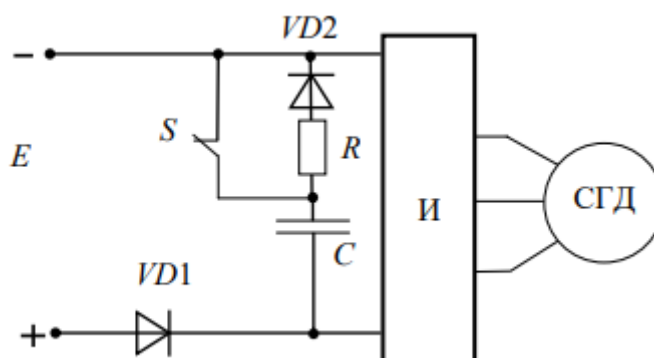


Рисунок 1.15 – Электропривод синхронно-гистерезисного двигателя без протекания импульсного тока намагничивания через основной источник

При работе слабовозбуждённого синхронно-гистерезисного двигателя конденсатор заряжается реактивным током до напряжения питания, большего напряжения основного источника E . При достижении напряжения на конденсаторе величины, например, в 2 раза превышающей напряжение основного источника, замыкается полупроводниковый ключ и к двигателю прикладывается повышенное напряжение. При этом диод $VD2$ предотвращает протекание импульсного тока через основной источник.

Развитием представленных выше устройств импульсного намагничивания с использованием реактивной энергии являются схемы, учитывающие особенности автономного инвертора напряжения. На рис. 1.16 представлены такие схемы.

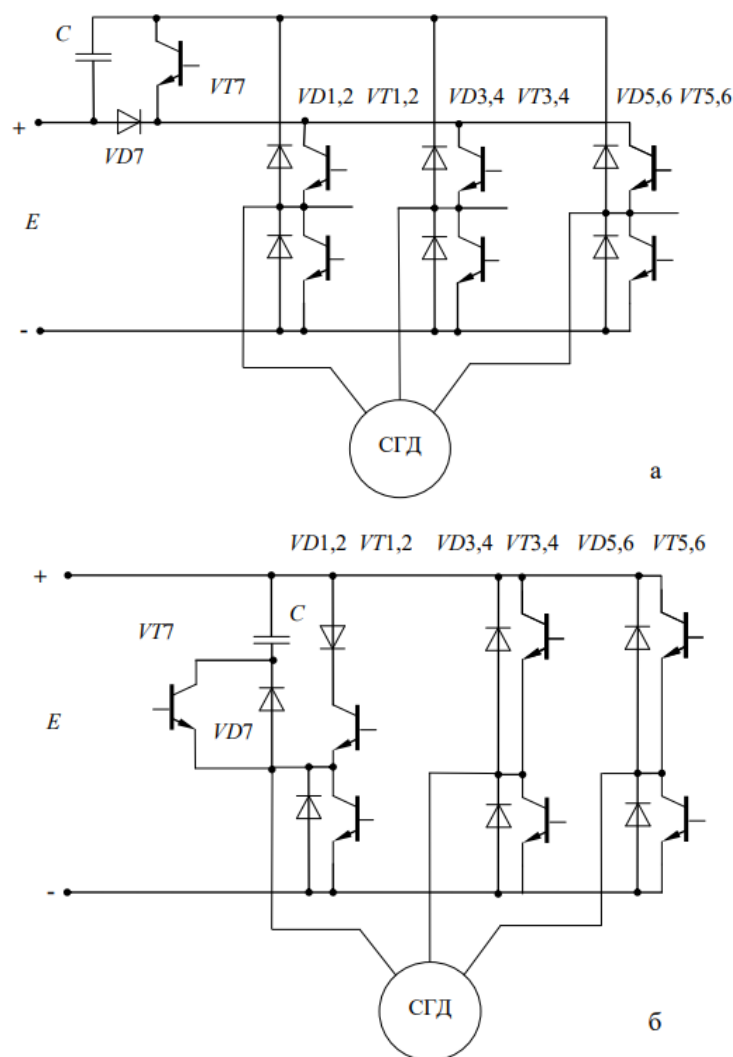


Рисунок 1.16 – Варианты устройств импульсного намагничивания с использованием моста обратных диодов автономного инвертора

Согласно рис. 1.16а, конденсатор заряжается через мост обратных диодов инвертора и через основной источник питания. При достижении напряжения на конденсаторе, равного приблизительно напряжению основного источника, замыкается транзисторный ключ VT7, и конденсатор подключается последовательно с основным источником питания. К двигателю прикладывается двойное напряжение, и по мере разряда конденсатора синхронно-гистерезисный двигатель перевозбуждается.

В схеме на рис. 1.16б при потере двигателем перевозбуждения или выпадения его из синхронизма его реактивный ток резко увеличивается и, протекая через обратный диод VD7, заряжает конденсатор. Заряженный

конденсатор разряжается при включении транзистора VT7, перевозбуждая двигатель. При разряде конденсатор оказывается включенным последовательно с основным источником питания инвертора. Диод VD1 предотвращает протекание инверсного тока через транзистор VT1. При достижении режима перевозбуждения cosφ двигателя увеличивается, и заряд конденсатора прекращается.

Рис. 1.17 показывает схему устройства импульсного намагничивания, использующую пульсации входного тока инвертора.

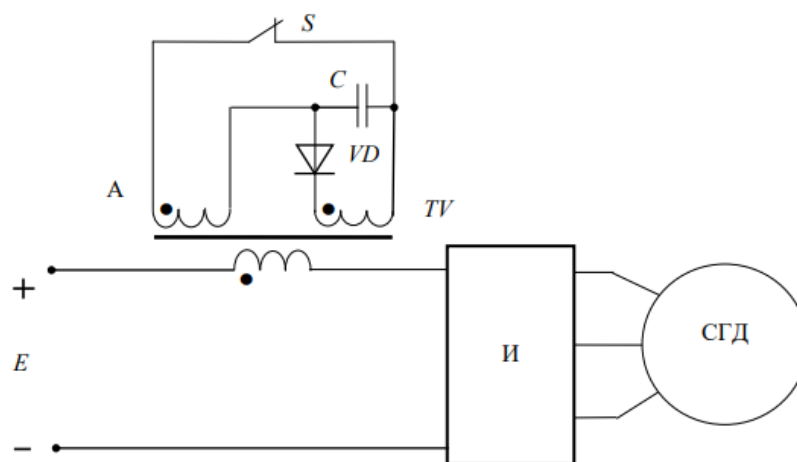


Рисунок 1.17 – Устройство для перевозбуждения синхронно-гистерезисного двигателя, использующие пульсации тока инвертора

Пульсирующий ток, протекающий по цепи питания инвертора через первичную обмотку трансформатора, трансформируясь во вторичную обмотку, заряжает накопительный конденсатор. При замыкании разрядного ключа энергия, накопленная на конденсаторе, трансформируется через обмотку А в цепь питания инвертора в виде короткого импульса, который перевозбуждает двигатель. Т. к. частота следования импульсов перевозбуждения ниже частоты питания синхронно-гистерезисного двигателя, за время паузы между импульсами на конденсаторе накапливается энергия, достаточная для перевозбуждения двигателя. Нужные для перевозбуждения параметры импульсов обеспечиваются соответствующим

соотношением числа витков обмоток импульсного трансформатора и режимом работы разрядного ключа.

При перевозбуждении синхронно-гистерезисного двигателя его $\cos\varphi$ увеличивается, стремясь к единице, характер нагрузки инвертора приближается к активной, и пульсации тока в цепи питания инвертора снижаются. В таком режиме последовательно включенная обмотка импульсного трансформатора работает как сглаживающий дроссель. Достоинство схемы: отсутствие полупроводниковых ключей в цепи питания инвертора.

Особенность импульсного намагничивания при формировании импульсов по цепи питания инвертора состоит в том, что на двигателе напряжение повышается симметрично во всех фазах. При таком формировании импульсной магнитодвижущей силы со стороны статора не учитывается фактическое положение ротора, определяемое углом нагрузки. В результате может произойти перемагничивание материала ротора со сдвигом полюсов по его телу, что в результате приведет к его скольжению. Для предотвращения этого явления в момент формирования импульсов нужно задержать работу ключей инвертора т. о., чтобы полюса ротора совместились в пространстве с импульсной магнитодвижущей силой статора. В этом случае синхронно-гистерезисный двигатель, перевозбуждаясь, остается в синхронизме. Необходимость в задержке работы ключей инвертора отсутствует в схемах блока импульсного подмагничивания, размещаемых на выводе инвертора.

Ещё одна особенность при формировании импульсов намагничивания: необходимость рассеяния электромагнитной энергии в обмотках статора непосредственно после прохождения импульса. После импульса в двигателе в зависимости от схемы устройства импульсного намагничивания образуется в общем случае несимметричное магнитное поле, периодическая составляющая которого неподвижна в пространстве относительно обмоток статора. Время затухания этого поля определяется постоянной времени цепи протекания тока

и может составлять несколько периодов питающего напряжения. Ротор синхронно-гистерезисного двигателя, вращаясь в этом поле, теряет часть приобретенной в импульсе намагниченности, что уменьшает эффективность перевозбуждения. Сохранить приобретенный уровень намагниченности можно, если быстро погасить неподвижное в пространстве поле. При этом просто отключить двигатель от сети нельзя, поскольку неизбежно возникновение перенапряжений. На рис. 1.18 показана схема устройства импульсного намагничивания с цепью гашения энергии поля, запасенного в обмотках статора при формировании импульса.

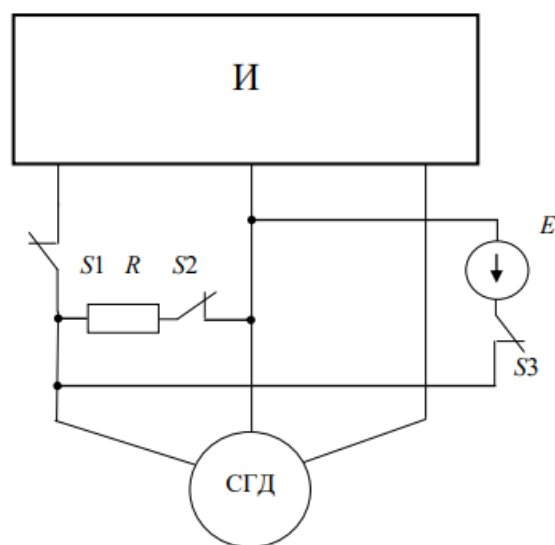


Рисунок 1.18 – Устройство импульсного намагничивания с цепью гашения энергии поля

Принцип действия: до прихода намагничивающего импульса полупроводниковый ключ $S1$ замкнут, а ключи $S2$, $S3$ разомкнуты. При формировании импульса намагничивания ключ $S1$ размыкается и одновременно замыкается ключ $S3$. Синхронно-гистерезисный двигатель намагничивается передним фронтом импульсного тока. В момент окончания импульса напряжения ключ $S3$ размыкается с одновременным замыканием ключа $S2$ и энергия, запасенная в импульсе, рассеивается на разрядном резисторе. При снижении импульсного тока до номинального значения

синхронно-гистерезисного двигателя ключ $S2$ размыкается, а ключ $S1$ вновь замыкается.

На рис. 1.19 гасящий резистор включен в цепь питания основного инвертора и зашунтирован диодом. После окончания импульса реактивный ток замыкается через мост обратных диодов инвертора И, гасящий резистор R и выходной конденсатор первичного источника питания E . Наличие в цепи протекания тока гасящего резистора R , как и в предыдущем примере, снижает постоянную времени цепи и приводит к быстрому спадаанию тока до номинального значения.

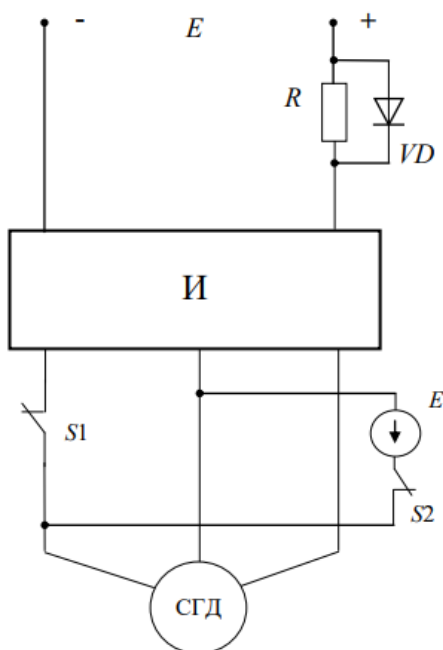


Рисунок 1.19 – Размещение устройства гашения энергии поля в цепи постоянного тока инвертора

Схема импульсного намагничивания, приведенная на рис. 1.11 также способна выполнять процедуру гашения поля от импульса намагничивания. Для этого непосредственно после окончания импульса намагничивания меняется алгоритм работы ключей нулевого инвертора. Согласно рис. 1.11 работа полупроводникового ключа $S3$ задерживается на время спадаания импульсного тока, и вместо ключа, например, $S1$ включается ключ $S2$. Т. о. в фазном напряжении питания синхронно-гистерезисного двигателя образуется

импульс противоположной полярности, что равносильно введению противоЭДС, или дополнительного сопротивления. При этом импульсный ток снижается, и при достижении номинального значения тока перевозбужденного синхронно-гистерезисного двигателя ключи S1 и S2 включаются, а ключ S3 выключается.

Если в инверторе реализуется закон широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения, то, вводя задержку в работу ключей инвертора, т. е., «вырождая» на время номинальный алгоритм ШИМ, можно получить возрастание тока на интервале задержки. Т. о. также достигается режим перевозбуждения двигателя.

Практически всегда при небольших отклонениях, порядка 5-10 эл. градусов, от номинальных значений фазы импульса намагничивания синхронно-гистерезисный двигатель находится в синхронизме, находясь в так называемой зоне синхронной работы. Номинальные значения фазы импульса относительно фазного напряжения составляют обычно величину 120-150 эл. градусов [7].

2. Применение синхронно-гистерезисных двигателей в гироскопических приборах

2.1. Свойства гироскопа, которые определяют его применение

«Гироскоп – это быстро вращающийся маховик, закреплённый в устройстве, который обеспечивает поворот оси вращения маховика относительно основания, на котором он установлен». Самое известное устройство - карданов подвес, который состоит из двух рамок 3 и 4 (рис. 2.1).

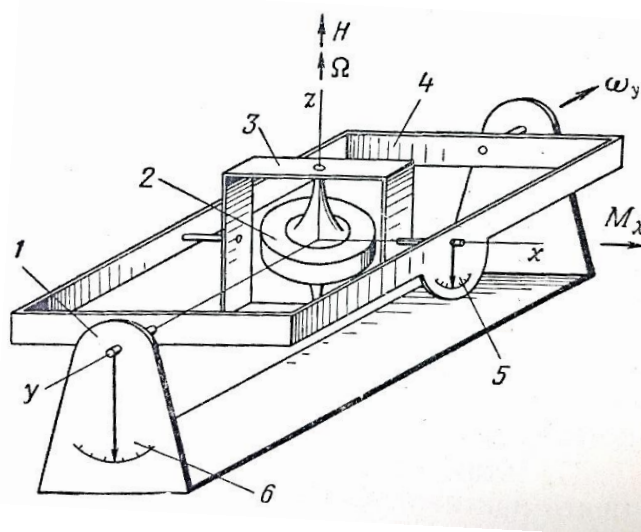


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема трёхстепенного гироскопа:

1 – корпус; 2 – маховик; 3 – внутренняя карданова рамка; 4 – наружная карданова рамка; 5 – индикатор поворота внутренней рамки; 6 – индикатор поворота внешней рамки

Ось вращения маховика z - главная ось гироскопа или ось фигуры. Оси вращения x и y пересекаются в одной точке и перпендикулярны друг другу. Маховик вместе с двигателем, который приводит его во вращение - это гиродвигатель.

Известно, что если к одной из осей гироскопа, например x , приложить момент вращения M_x , то возникает вращение рамки не вокруг этой оси, как для обычных тел, а вокруг перпендикулярной оси y . Поворот рамки 4 вокруг оси y под действием момента M_x – это прецессия гироскопа. Направление и величина скорости прецессии определяются уравнением:

$$M = [H \times \omega] \quad (1)$$

Если оси гироскопа взаимно перпендикулярны, то уравнение (1) для скорости прецессии можно записать так:

$$\omega_y = \frac{M_x}{H} \cdot 10^5 \quad (2)$$

где M_x – момент внешних сил в н·см; $H = J \cdot \Omega$ – кинетический момент маховика в (г·см²)/сек; J – момент инерции маховика относительно оси вращения z в г·см²; Ω – угловая скорость его вращения в 1/сек; ω_y – угловая скорость прецессии гироскопа вокруг оси y в 1/сек.

Данное свойство гироскопа обратимо. То есть, при вращении внешней рамки гироскопа с угловой скоростью ω_y возникает гироскопический момент M_x . Направление такого момента определяется уравнением (1): момент стремится совместить главную ось z гироскопа с осью y по короткому пути.

Оси x и y равноправны. Когда момент вращения приложен к оси x , то происходит прецессия вокруг оси y и. Это действует и наоборот. Когда момент вращения приложен оси y – прецессия вокруг оси x . Прецессионное движение оси ротора гироскопа является безынерционным: когда момент внешних сил исчезает, движение его оси мгновенно прекращается.

Следствием основного свойства гироскопа (прецессия в перпендикулярном направлении под действием внешнего момента) является желание поддерживать постоянное направление оси вращения маховика в абсолютном пространстве. Так как внешний момент $M_x = M_y = 0$, то скорость прецессии $\omega_x = \omega_y = 0$, следовательно, остаётся постоянным и положение оси ротора гироскопа. Но даже если на гироскоп действует «вредный» момент, то скорость вращения его главной оси в тысячи раз меньше, чем при том же моменте, который приложен к неподвижному маховику.

На этих особенностях и основано широкое применение гироскопов в технике [8].

2.2. Влияние гиродвигателя на точность прибора

Гироскоп оценивается по его статической и динамической точности. Причиной появления ошибок гироскопа является наличие паразитных моментов вокруг осей вращения его рамок. Различные типы возмущений, которые привязаны к рамкам в виде моментов, могут вызвать их колебания и угловые перемещения. В установившемся режиме работы характер изменения скорости прецессии рамок будет точно повторять характер изменения возмущающих кардановых моментов. При наличии паразитного карданова момента $M_0 = M_k$ уравнение для гироскопа положения запишется так:

$$H \cdot \Delta\omega_y = \pm M_k,$$

и его прецессия:

$$\Delta\omega_y = \pm \frac{M_k}{H} \cdot 10^5 \left(\frac{1}{\text{сек}} \right) = \pm 2,06 \cdot 10^{10} \cdot \frac{M_k}{H} \left(\frac{\text{град}}{\text{час}} \right)$$

Следовательно, ось гироскопа «уходит», поворачиваясь в абсолютном пространстве. Именно скоростью ухода гироскопов в свободном состоянии и оценивается качество и уровень развития всей гироскопической техники.

Также для скоростного гироскопа получим:

$$k_{np} \alpha_x + H \cdot \omega_y = \pm M_k :$$

$$\omega_y = -\frac{k_{np}}{H} \cdot \alpha_x \pm \frac{M_k}{H} = \omega_n \pm \Delta\omega_y,$$

где ω_y – истинная угловая скорость; ω_n – угловая скорость по прибору; $\Delta\omega_y$ – ошибка измерения скорости.

Такая ошибка равна некоторой условной скорости ухода под действием момента M_k . Можно также показать, что для других типов гироскопов статическая ошибка определяется схоже. Одинаковая запись для статической ошибки гироскопа независимо от его типа и физической природы измеряемой величины является следствием того, что все гироскопы используют одно и то же свойство – появление гироскопического момента при наличии угловой скорости или внешнего вида угловой скорости при приложении момента.

Чем больше отношение кинетического момента к суммарному карданову моменту, тем выше точность прибора. Если кинетический момент не изменяется, создаваемая им ошибка является постоянной и может быть скомпенсирована в гироскопе при ее настройке точно так же, как установлен нуль электроизмерительного прибора. Самыми опасными являются переменные кардановы моменты. Они делятся на систематические и случайные. Систематический момент можно измерить и скомпенсировать либо в самом приборе, либо в системе, которую прибор обслуживает. Компенсация обычно основана на предварительном знании условий эксплуатации: ускорении, температуре или вибрации. Случайные изменения, которые невозможно предвидеть, вызовут некомпенсируемые моменты. Разность между общим систематическим моментом, ожидаемым для данной ситуации, и общим измеренным моментом является случайным моментом. Такие ошибки компенсировать невозможно, можно лишь предусмотреть меры по их устранению. Именно такие ошибки и определяют точность giroприборов. Уменьшение случайных моментов – основная задача, которая решается в гироскопии. Чтобы оценить, с какими величинами этих моментов имеет дело современная гироскопия, оценим суммарный карданов момент, вызывающий дрейф не более 10^{-1} град/час. В самом деле, при реальных кинетических моментах современных гироскопов в 10^5 - 10^6 г·см²/сек суммарный карданов момент должен быть не более $5 \cdot (10^{-7} - 10^{-6})$ н·см. Такой момент равносителен моменту от смещения вдоль оси горизонтально вращающегося маховика массы в 5 г на расстоянии 1 – 0,1 мк.

Чтобы выдвинуть требования к гиродвигателю и наметить пути реализации, нужно детально рассмотреть основные причины появления кардановых моментов.

Одним из основных возмущающих моментов является момент трения в опорах карданова подвеса. Чтобы уменьшить его, нужно уменьшить вес гиروزла и выбрать опоры высокого класса точности с минимальным трением. Наиболее радикальным средством уменьшения момента трения в опорах

является применение поплавковых гироскопов. В поплавковом гироскопе (рис. 2.2) гиродвигатель 6 помещен в герметезированную внутреннюю рамку 3 – поплавок.

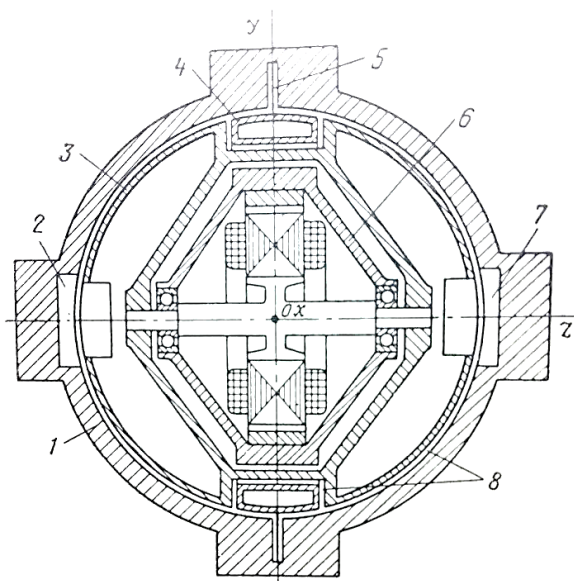


Рисунок 2.2 – Принципиальная конструктивная схема поплавкового трёхстепенного гироскопа:

1 – корпус; 2 – датчик положения, измеряющий углы поворота внутренней рамки относительно осей x и y ; 3 – внутренняя поплавковая рамка; 4 – внешняя поплавковая рамка; 5 – нить, центрирующая внешнюю рамку; 6 – гиродвигатель; 7 – датчик момента относительно осей x и y ; 8 – пространство, заполненное гироскопической жидкостью

Полость корпуса 1 прибора залита жидкостью. Если средний удельный вес гироузла выбирается равным удельному весу жидкости, то гироузел подвешен в жидкости и не оказывает радиального давления на опоры внешней рамки. Если, кроме того, взвешена внешняя рамка, то и разгружены опоры корпуса. В этих условиях при любых внешних перегрузках усилия, испытываемые опорами, практически устраняются, что позволяет использовать в качестве элементов, которые центрируют гироузел, delicate опоры на камнях и нити. Так на рис. 2.2 гироузел центрирован относительно внешней рамки 4 путем «безмоментной» нити и может спокойно

вращаться вокруг оси x . Внешняя рамка, которая является полым кольцом, центрирована относительно корпуса с помощью аналогичной нити 5, которая позволяет рамке поворачиваться относительно оси y . В корпусе укреплены датчик угла 2, который измеряет углы поворота рамок, и датчик момента 7, создающий моменты относительно кардановых осей для компенсации постоянного ухода.

На рис. 2.3 изображена конструкция современного поплавкового двухстепенного гироскопического прибора.

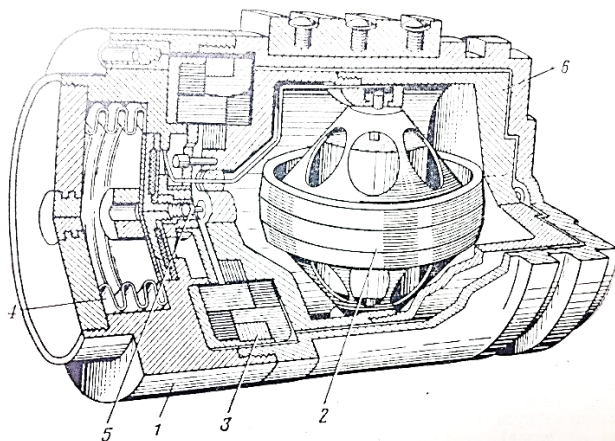


Рисунок 2.3 – Поплавковый двухстепенный гироскоп:

- 1 – корпус; 2 – гидродвигатель; 3 – электромагнитный датчик угла и момента;
4 – сильфон; 5 – карданова опора; 6 – поплавок

Роль демпфера выполняется вязкой жидкостью в небольшом зазоре между цилиндрическим гиروزлом 6 и корпусом 1. Вязкость жидкости в интегрирующем гироскопе должна быть намного больше, чем в скоростном. Гиروزел центрируется на скользящих опорах. Расширение жидкости компенсируется сильфоном 4. Чтобы обеспечить согласованность силы жидкости, применяется система регулирования её температуры.

Появление поплавковых приборов позволило за счёт гидростатической разгрузки опор снизить вредные кардановы моменты и повысить точность приборов [9].

В дополнение к моменту трения в опорах большое влияние также могут оказывать моменты в других трущихся элементах прибора – потенциометрах,

точечных и скользящих токосъёмниках. В конструкциях последних лет вместо потенциометров используются бесконтактные датчики угла, чтобы уменьшить момент трения. Момент от токоподводов пропорционален их жёсткости. Последняя пропорциональна поперечному сечению, а следовательно и току гиродвигателя и потребляемой им мощности.

Другая причина появления карданова момента - смещение центра масс гироузла относительно центра подвеса или несбалансированность прибора. При сборке гироузел балансируется относительно центра подвеса, а точность балансировки с использованием современных средств довольно высока. Остаточная несбалансированность – это систематическая ошибка, которая может быть учтена. Гораздо большую опасность представляют случайные смещения центра масс во время работы. Они могут возникать в течение одного запуска при изменении режима работы или внешних условий. Смещение центра масс происходит, например, по оси z внутренней рамки в несимметричной конструкции гиродвигателя (рис. 2.4) за счёт «открытия» колокола ротора под действием центробежных сил.

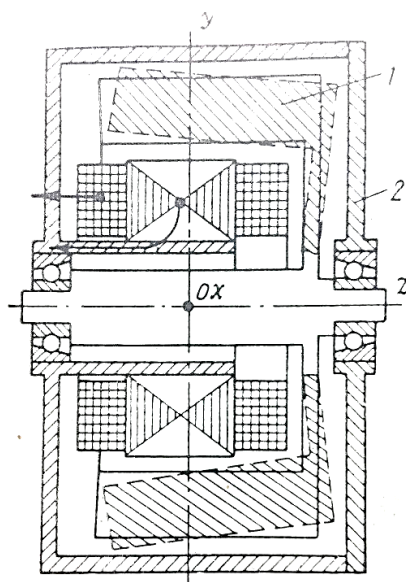


Рисунок 2.4 – К пояснению эффекта «раскрытия» маховика и односторонних путей отвода тепла (стрелками показаны пути отвода тепла)

1 – маховик; 2 – внутренняя карданова рамка

Аналогичный эффект смещения центра масс также обусловлен несимметричными температурными деформациями при несимметричном расположении источников тепла или теплоотводов. Поэтому при включении несимметричного гиродвигателя (см. рис. 2.4) из-за неравенства теплопередачи правая половина нагреется сильнее, чем левая, произойдёт её большее расширение и центр масс сдвинется. Тогда при действии на гиродвигатель ускорения, например, в плоскости чертежа, появляется вредный момент вокруг оси, перпендикулярной этой плоскости. Смещение центра масс с изменением температуры может быть даже у гиродвигателя симметричной конструкции с различной жесткостью двух его половин в осевом направлении. Температурные деформации происходят с любым изменением теплового режима: температуры внешней среды, распределения потерь между элементами прибора, включении и выключении гиродвигателя и колебаниях потребляемой им мощности.

Смещение центра масс также возникает из-за неравножесткости элементов гироскопа вдоль разных осей. Под влиянием некоторой силы (внешней инерциальной, силы от вибрации или от изменения температуры) из-за разной упругости элементов центр масс гироскопа смещается и не в направлении силы. Угол между направлением силы и смещением зависит от соотношений жесткостей гироскопа в различных направлениях. Смещение центра масс и карданов момент от неравножесткости вокруг оси какой-либо рамки является максимальным, когда нагрузка действует в плоскости оси другой рамки и оси маховика под углом в 45° к этим осям. Чем больше абсолютная величина жесткости вдоль трех взаимно перпендикулярных осей, тем меньше разница между ними и меньшей перегрузкой, тем меньше смещение центра масс и карданов момент [10].

Наименьшей жесткостью в приборе обычно являются подшипники и крышки гиродвигателя, поэтому часть ошибок из-за неравножесткости современного гироскопа ложится на гиродвигатель. Даже при отсутствии внешних перегрузок момент от неравножесткости иногда составляет

существенную величину только под действием веса гиродвигателя и его собственных вибраций, которые возникают в связи с динамической несбалансированностью, неточной геометрией подшипников и вибрационных электромагнитных сил.

К тому же типу моментов можно отнести момент от статической и динамической несбалансированности, который имеет место даже в гироскопе, который имеет равножесткость в перпендикулярных направлениях. Это происходит потому, что любое усилие (даже радиальное), которое действует на подшипники главных опор, вызывает смещения как в радиальном, так и в осевом направлениях. Если правая и левая половины гиродвигателя не имеют равную жесткость в осевом направлении, то радиальная нагрузка может вызвать результирующее осевое перемещение, которое подействует в сторону той половины гиродвигателя, которая имеет меньшую жесткость [11].

Так как рассмотрены только некоторые из факторов, которые определяют появление кардановых моментов и точность гироскопа, в таблице 1 приведена систематизация кардановых моментов.

Таблица 2.1 – Кардановы моменты и связь их с гиродвигателем

Источники кардановых моментов	Связь моментов с гиродвигателем
СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ	
Чувствительные к ускорению	
Несовпадение центра подвеса и центра плавучести гиروزла связано с неточной геометрией поплавка и неравенством плотности жидкости плотностям элементов, которые несимметричны относительно оси подвеса.	Когда изменяется нагрев гиродвигателя, изменяется и момент воздействия жидкости на поплавок.
Температурные градиенты в жидкости, которые могут вызвать конвекционные токи	Это может зависеть от несимметрии тепловых потоков гиродвигателя

Упругие несимметричные температурные деформации	Это может зависеть от нагрева гиродвигателя и это особенно может проявляться при его запусках
---	---

Продолжение таблицы 2.1.

Первоначальная несбалансированность рамки	Может определяться массой гироузла и точностью взвешивания поплавка, которая зависит от несимметрии тепловых потоков гиродвигателя.
Пространственная неравножесткость	Это может зависеть от массы гиродвигателя и его собственных вибраций
Нечувствительные к ускорению	
Упругие моменты в торсионах, центрирующих нитях, токоподводах ленточного типа, а также реактивные моменты датчиков угла и аэростатических опор	Момент в токоподводах может зависеть от потребляемой гиродвигателем мощности, а моменты в опорах – от массы гиродвигателя.
Взаимодействие внешних магнитных полей с магнитными материалами рамок и магнитных полей элементов рамок с магнитными и электропроводными материалами корпуса прибора	Может влиять на изменение напряжения питания и тока гиродвигателя
Неперпендикулярность главной оси гироскопа к осям его рамок	Может зависеть от равномерности вращения маховика в пределах одного оборота
Гидродинамическое трение поплавка об жидкость	Может определяться размерами гироузла и точностью поддержания температуры жидкости
СЛУЧАЙНЫЕ МОМЕНТЫ	
Нестабильность балансировки, вызываемая неупругими деформациями и износом шарикоподшипников гиродвигателя	Может проявляться из-за температурных циклов при запусках гиродвигателя и нестабильности его мощности

Трение в кардановых опорах, потенциометрических, точечных и скользящих токосъёмниках	Может влиять масса гиросузда, потребляемая гиродвигателем мощность и её стабильность
Гистерезис в упругих опорах или токоподводах	Помимо всего прочего, может зависеть от стабильности температурного режима

Продолжение таблицы 2.1.

Трение поплавок о жидкость, которое связано с возникновением пузырьков и загрязнением жидкости	Может определяться абсолютным нагревом и значительными температурными циклами
--	---

Каждый из тех моментов, которые связаны с систематическими моментами, имеет случайную составляющую. В таблице 2.1 случайные моменты – это моменты, которые имеют только случайные составляющие.

Для повышения точности при разработке гироприбора конструктор тщательным образом анализирует возможные кардановы моменты, намечает конструкторские и технологические меры по их уменьшению. Существующие методы искусственной компенсации дрейфа гироскопа эффективны только после того, как был использован весь арсенал конструкторских и технологических мероприятий.

По мере совершенствования приборов и повышения его точности, приходится иметь дело со все более «деликатными» источниками дрейфа. В настоящее время это не момент трения в кардановых опорах, который составляет основную часть вредных моментов прецизионного прибора. Нужно учитывать все перечисленные источники дрейфа. В таких условиях особенно важно провести анализ влияния гиродвигателя и оценка его роли в приборе.

Гиродвигатель как по положению, так и по своему значению, является центральным элементом любого гироскопического прибора. Если гиродвигатель часто рассматривается как основной источник точности прибора, потому что он обеспечивает требуемый ему кинетический момент, то нужно иметь в виду, что он становится самым важным источником ошибок

современного гироскопа. Дело в том, что гиродвигатель в некоторой степени определяет большинство кардановых моментов, в том числе и те, которые на первый взгляд с ним в принципе и не связаны.

Так, поскольку рамки гироскопа, его датчики и арретирующие устройства расположены конструктивно вокруг гиродвигателя, то размеры гироскопа в большей степени определяют размеры всего прибора. Поэтому ряд вредных моментов гироскопа, в зависимости от массы и размеров, например, момент трения в опорах и момент от смещения центра масс, связан с массой и размерами гиродвигателя. Преобладающая часть момента от смещения центра масс лежит также на гиродвигателе, поскольку он состоит из большого количества деталей, которые выполнены из различных материалов, причем часть из них быстровращающиеся. Гиродвигатель к тому же является главным потребителем энергии и источником тепла в современном гироскопе и во многом определяет вредные моменты, которые вызваны возможными тепловыми флюктуациями. В поплавковых гироскопах момент в опорах в некотором случае может зависеть от нагрева гиродвигателя, так как он является причиной перепадов температуры внутри гироузла и его остаточной невзвешенности. Независимо от типа используемого токоподвода, выбор его параметров (сечение волоска, контактное усилие, поверхность контактов и пр.) и величина момента в нем может зависеть от тока, следовательно, и от потребляемой мощности гиродвигателя. Момент от конвекционных токов в жидкости определяется размерами гиродвигателя и его нагревом, поскольку с ним связаны градиенты температур вдоль поверхности гироузла. К тому же, ряд вредных моментов обусловлен температурными градиентами внутри гиродвигателя, износом его подшипников, статической и динамической разбалансировкой маховика и так далее.

Поэтому стоит отметить гораздо большее влияние гиродвигателя на точность гироскопа. То есть, чем точнее прибор, выше культура его конструирования и изготовления, тем более ощутимы вредные моменты, которые связаны с гиродвигателем, которыми раньше частенько

пренебрегали из-за конкретных моментов разбалансировки, трения в кардановых опорах и потенциометрах. Поэтому корень проблемы точности прибора смещается к гиродвигателю.

Точность гироскопа определяется величиной постоянства кинетического момента. При изменении кинетического момента изменяется коэффициент пропорциональности и соотношение между коррекционными моментами датчиков и прецессией – нарушается компенсация постоянной скорости ухода гироскопа. Высокая стабильность кинетического момента – одно из условий обеспечения высокой точности прибора. Это достигается стабилизацией скорости вращения гиродвигателя. Иногда требуемая точность поддержания кинетического момента настолько велика, что анализируются возможные способы устранения изменений момента инерции маховика под действием температурных деформаций.

Если к вопросам, которые связаны с точностью, добавить такие вопросы как: надежность, долговечность, устойчивость к внешним перегрузкам и т. д., то можно представить объем трудностей, которые неминуем при проектировании гиродвигателя и может сопутствовать обеспечению желаемого кинетического момента. Именно из-за этого вопросы проектирования оптимального гиродвигателя становятся актуальными и требуют старательной разработки.

Основной путь повышения точности гироскопов традиционной конструкции – это устранение кардановых моментов. Чтобы уменьшить момент трения, кроме гидростатической разгрузки кардановых опор, также применяются и другие методы: применение аэроостатических опор, электромагнитной подвески и разновращающихся кардановых подшипников. Чтобы обеспечить максимальную стабильность положения центра масс улучшаются конструкции приборов и используются новые материалы и технологические процессы.

Предел точности гироскопов с кардановой системой подвески ограничен. Тепловые шумы являются таким ограничением. Но в реальности

погрешность от несбалансированности не может уменьшиться до погрешности тепловых шумов. Предел точности гироскопов обычной конструкции составляет 10^{-3} град/час. В условиях невесомости, когда моменты несбалансированности отсутствуют и есть только моменты от собственных вибраций и трения, точность может значительно увеличиться.

Большую точность можно получить в гироскопах, которые построены на других принципах. К таким гироскопам можно отнести аэродинамический гироскоп, точность которого предполагается довести до 10^{-4} град/час, электростатический, криогенный и молекулярный с ожидаемой точностью до 10^{-6} град/час [12].

Однако даже при широком внедрении новых принципов область применения традиционных гироскопов, которые уступают в точности, но обладают рядом других одинаково важных преимуществ, вообще не сузится.

2.3. Требования к гиродвигателям и пути их обеспечения

Конструирование гироскопических приборов - одна из тех областей, где успех во многом зависит от интуиции, изобретательности, знаний и практического опыта конструктора. Поэтому рассмотрим только общие положения и практические правила, которые вытекают из этих положений.

Что касается прибора, то при проектировании гиродвигателя конструктор должен обеспечить требуемые ему характеристики с минимальным весом, габаритами и стоимостью. И это должно достигаться обычно с очень высокой надежностью гиродвигателя и относительно жестких внешних температурных и механических нагрузках. В дополнении к этим общим требованиям, чтобы обеспечить максимальную точность на гиродвигатель накладывается ряд конкретных требований:

1. Симметрия и равножесткость;
2. Механическая стабильность составляющих его элементов и соединений;
3. Минимум и постоянство в течение длительного промежутка времени потребляемой мощности нагрева;
4. Максимальное отношение кинетического момента к весу.

Выполнение этих требований создаёт предпосылки для стабильного положения центра масс гиродвигателя и снижает влияние его на кардановы моменты.

Симметрия и равножесткость - общие требования для всего гироскопа, но в применении к гиродвигателю это особенно важно, так как при его несимметрии относительно экваториальной плоскости может произойти смещение его центра масс под действием механических сил и температурных деформаций. Идеальной симметрии гиродвигателя трудно достичь. Однако не всякая несимметрия в конструкции настолько значительна. Желательно, прежде всего, иметь симметрично расположенные вращающиеся и наиболее нагретые элементы, а также элементы со значительной массой. Обязательны и симметричные связи этих элементов. Несимметрия ряда второстепенных

деталей, продиктованных конструктивными особенностями, допускается, если анализ возможных смещений показывает их малость. В общем случае под симметрией гиродвигателя понимается не только симметрия геометрическая, но и симметрия масс, тепловых, магнитных полей и т. д., которые обычно являются следствиями геометрической симметрии.

Но даже в идеально симметричной конструкции возможны температурные и другие смещения, если правая и левая половины гиродвигателя неравножестки относительно экваториальной плоскости. Равножесткость правой и левой половин гиродвигателя гарантируется правильными допусками для изготовления одинаковых крышек (или других деталей) и подшипников. Более того, поскольку даже внутри практически допустимых узких допусков возможны большие разбросы в жесткостях элементов, то нужно обеспечить выбор деталей с одинаковой жесткостью.

Кроме того, необходимо обеспечить равенство осевой и диаметральной жесткостей гиродвигателя. Наилучшим способом обеспечения такой равножесткости является сборка гиродвигателя из равножестких элементов. Порядок жесткости элементов различен. Наиболее податливы являются обычно подшипники и крышки, которые должны быть равножесткими в первую очередь. Не всегда в конструкции можно получить элементы равножесткими. В этом случае неравножесткость одного элемента может быть скомпенсирована неравножесткостью другого. Однако это может привести к многорезонансной (с несколькими низкими собственными частотами) конструкции, что ощутимо снижает доступный диапазон внешних вибраций.

Механическая стабильность элементов и соединений гиродвигателя заключается в их способности поддерживать постоянство положений центров масс в различных режимах работы и при различных внешних условиях. Механическая неустойчивость элементов может быть связана:

- с неэластичностью материалов, которая характеризуется гистерезисом перемещений при циклических нагружениях; чтобы её уменьшить, выбирают напряжения в материалах значительно ниже предела упругости.

- с нестабильностью внутренней структуры конструкционного материала; чтобы её устранить, применяют спец. методы термической стабилизации;

Ещё более значительна нестабильность соединений деталей. Чем меньше деталей и напряженных посадок, тем меньше эта нестабильность. Суть такого рода нестабильности заключается в том, что в циклах механических и тепловых деформаций элементы необратимо смещаются относительно друг друга. Нестабильность, которая вызвана температурными циклами является труднейшей проблемой конструирования гиродвигателя.

Идеальный (нереальный) случай имеет место с тем же нагревом и равенством коэффициентов теплового расширения всех деталей. На практике стремятся как можно больше подойти к сокращению числа соединений элементов гиродвигателя, уравновесить температуру внутри гироузла и выбрать материалы с соответствующими коэффициентами теплового расширения.

Максимальное отношение кинетического момента гиродвигателя к весу называется добротностью, поскольку её увеличение при прочих равных условиях означает увеличение точности гироскопа. Однако последнее справедливо только в том случае, когда другие требования выполняются одновременно. Увеличение добротности может быть обеспечено за счёт увеличения плотности материала частей, вращающихся на большом радиусе инерции, и уменьшения её для всех остальных элементов. На практике это достигается увеличением числа элементов гиродвигателя, вдобавок иногда с несогласующимися коэффициентами теплового расширения. В таком случае эффект увеличения точности может стать либо совсем незначительным, либо отрицательным.

Добротность можно увеличить также при увеличении скорости вращения гиродвигателя. Однако в этом случае эффект окажется противоположным, поскольку одновременно увеличиваются энергопотребление, нагрев, снижается долговечность и так далее.

Потребляемая мощность – это величина, которая определяет нагрев гиродвигателя и неравномерное распределение температур и вызывает ряд вредных моментов как непосредственно определяемых гиродвигателем, так и косвенно связанных с ним. Большинство из этих моментов являются постоянным, но только при постоянстве мощностей всех источников потерь внутри гиродвигателя. Поэтому очень важно, чтобы был не только абсолютный минимум потребляемой мощности, но и была стабильность её во времени. Также желательно равномерно распределять потери внутри объёма гиродвигателя и хорошие симметричные теплоотводы от каждого источника потерь. В противном случае неизбежны значительные температурные градиенты и деформации, вызванные ими.

Однако, значительная потребляемая мощность может привести к недопустимому перегреву и преждевременному разрушению гиродвигателя. Также могут возникнуть трудности в терморегулировании прибора, если он нагревается до температуры регулирования только за счёт мощности, которая потребляется гиродвигателем. Наконец, ограничение мощности связано в некоторых случаях с энергосбережением источников питания.

Минимум потребляемой мощности можно достичь:

- уменьшением аэродинамических потерь за счёт вакуумирования или заполнения гирокамеры легкими газами;
- уменьшением потерь в подшипниках с помощью применения подшипников, их сборок и смазки высшего качества;
- увеличением коэффициента полезного действия электродвигателя с помощью правильного проектирования и применения материалов с наилучшими характеристиками.

Чтобы достичь стабильности потребляемой мощности и её составляющих нужно:

- герметизировать гироузел, предварительно обезгазив элементы внутри него;

- в течение длительного времени обеспечить постоянство осевой нагрузки на подшипники, относительно низкую температуру подшипникового узла и безопасность смазки;

- применить источник питания, стабилизированный по частоте и напряжению.

Равномерное распределение температур внутри гироузла достигается путём удаления друг от друга основных источников потерь – подшипников и обмотки, а также при заполнении гироузла газами с хорошей теплопроводностью, допустим, гелием или водородом.

Обеспечение каждого из этих требований связано с определёнными конструкторскими и технологическими мерами, а также с материальными затратами. Тем больше стоимость гиродвигателя, чем выше уровень требований. В каждом конкретном случае конструктор находит компромисс между желаемыми характеристиками гиродвигателя и его стоимостью.

Стоит отметить, что универсальной конструкции для работы во всех условиях не может быть. Так, например, в таблице 2.2 приведены данные испытаний симметричного одностаторного синхронно-гистерезисного двигателя, который спроектирован для работы в водородной среде.

Таблица 2.2 – Сравнительные характеристики СГД в различных средах

Параметр	Среда		
	Воздух	Водород	Вакуум
Потребляемая мощность в Вт	21	13,5	10
Перегрев маховика в °С	8	4,5	59
Перегрев центра оси в °С	7,5	4,5	33
Перегрев обмотки статора в °С	42,5	26	96

Как можно увидеть, с изменением среды для одного и того же гиродвигателя условия нагрева значительно различаются. Этот гиродвигатель

предназначен для работы в газообразной среде и в его конструкции, по понятным причинам, не были предусмотрены пути увеличения теплопередачи теплопроводностью, что могло бы привести лишь к утяжелению конструкции при заданных условиях работы. Поэтому, когда он работает в вакууме, он оказывается полностью неработоспособным из-за больших абсолютных перегревов и перепадов температуры [13].

3. Расчёт устройства импульсного намагничивания

В качестве блока импульсного намагничивания была выбрана схема, изображенная на рис. 3.1. Такой выбор обоснован следующими достоинствами данной схемы: при выходе из строя полупроводниковых ключей блока импульсного намагничивания не нарушается целостность фазных проводников синхронно-гистерезисного двигателя. К тому же, источник постоянного тока может быть как дополнительным, так и основным – от звена постоянного тока автономного инвертора, поскольку может иметь общую точку с общей шиной постоянного тока статического преобразователя. Кроме того, такой блок импульсного намагничивания способен работать с любым основным источником питания – автономными инверторами напряжения или тока, генератором или промышленной сетью.

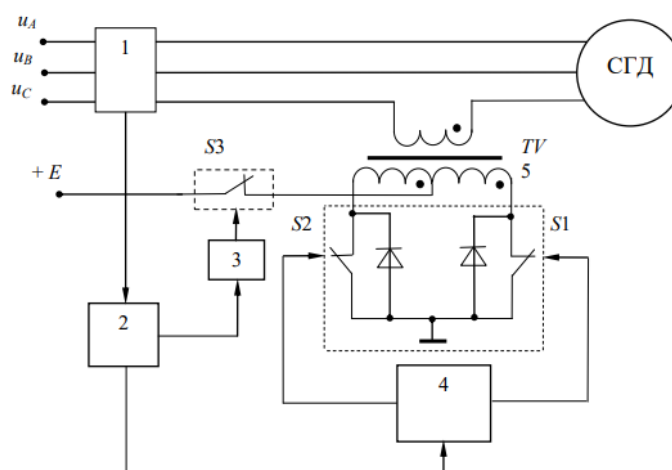


Рисунок 3.1 - Реализация БИН на основе нулевого инвертора в фазе синхронно-гистерезисного двигателя

3.1. Расчёт трансформатора

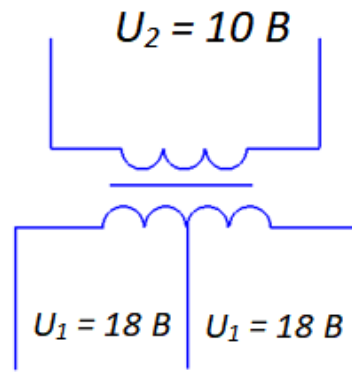


Рисунок 2 – Схема трансформатора

Исходные данные:

- $U_1 = 18 \text{ В}$ – напряжение в первичной обмотке;
- $U_2 = 10 \text{ В}$ – напряжение на вторичной обмотке;
- $f = 2400 \text{ Гц}$ – эквивалентная частота;
- $I_1 = 0.11 \text{ А}$ – ток в первичной обмотке;
- $I_2 = 0.2 \text{ А}$ – ток во вторичной обмотке;
- $P_1 = 2 \text{ Вт}$ – мощность трансформатора.

Коэффициент трансформации по соотношению:

$$k_{mp} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{18}{10} = 1.8$$

Сопротивление нагрузки, приведенное к напряжению первичной обмотки трансформатора, находится из выражения:

$$R_{\text{эkv}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{18}{0.11} = 163.64 \text{ Ом}$$

По известным токам и напряжениям обмоток и габаритной мощности трансформатора выбирается сердечник и определяются параметры обмоток, при этом число витков первичной обмоток рассчитывается исходя из наибольшего напряжения, прикладываемого к ней, чтобы исключить режим насыщения (замагничивания) сердечника трансформатора [14].

$$S_0 S_e = \frac{10^2 P_e}{2 f_{\text{вых}} k_c k_{\phi} \sigma B_m \delta} = \frac{10^2 \cdot 1.99}{2 \cdot 2400 \cdot 0.94 \cdot 1.11 \cdot 0.3 \cdot 1.35 \cdot 5} = 0.02 \text{ см}^4$$

где S_0 – площадь окна сердечника магнитопровода [см²];

S_e – поперечное сечение сердечника [см²];

$P_e = (U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2) / 2 = (18 \cdot 0.11 + 10 \cdot 0.2) / 2 = 1.99$ ВА – габаритная мощность двухобмоточного трансформатора;

$k_{\phi} = 1.11$ – коэффициент формы напряжения;

$k_c = 0.94$ – коэффициент заполнения сердечника сталь;

$\delta = 5$ А/мм² – плотность тока в обмотках трансформатора;

$\sigma = 0.3$ – коэффициент заполнения окна сердечника медью;

$B_m = 1.35$ Тл – индукция в магнитопроводе (для высокочастотной холоднокатанной изотропной листовой электротехнической стали марки 2421 толщиной 0.18 мм).

Выбираем сердечник марки 2421 из стандартного ряда магнитопроводов ОЛ 12/14 – 3 ($a = 1$ мм, $b = 3$ мм, $d = 12$ мм, $D = 14$ мм (рис. 3)), имеющий $S_0 S_e = 0.034$ см⁴.

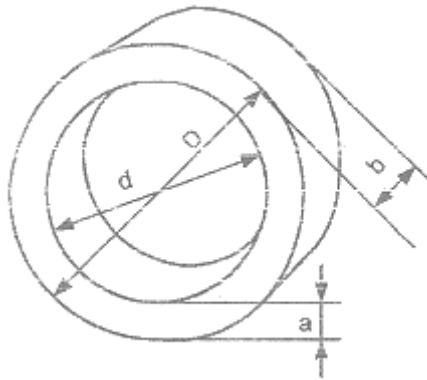


Рисунок 3 – Конструкция магнитопровода типа ОЛ

Число витков на один вольт ЭДС в обмотках трансформатора определяется по выражению:

$$W_0 = \frac{10^4}{4 \cdot k_{\phi} \cdot B_m \cdot f_{\text{вых}} \cdot S_e \cdot k_c} = \frac{10^4}{4 \cdot 1.11 \cdot 1.35 \cdot 2400 \cdot 0.03 \cdot 0.94} = 25 \text{ витков/вольт}$$

Число витков в первичной обмотке:

$$W_1 = U_1 \cdot W_0 = 18 \cdot 25 = 450 \text{ витков}$$

Число витков во вторичной обмотке:

$$W_2 = U_2 \cdot W_0 = 10 \cdot 25 = 250 \text{ витков}$$

Диаметры проводов обмоток:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4I_1}{\pi\delta}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.11}{3.14 \cdot 4}} = 0.17 \text{ мм}$$

выбираем провод ПЭВ-2 с диаметром провода с изоляцией 0.21 мм. Расчетное сечение $S = 0.0227 \text{ мм}^2$.

$$d_2 = \sqrt{\frac{4I_2}{\pi\delta}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.2}{3.14 \cdot 4}} = 0.23 \text{ мм}$$

выбираем провод ПЭВ-2 с диаметром провода с изоляцией 0.28 мм. Расчетное сечение $S = 0.04115 \text{ мм}^2$.

Из расчёта можно увидеть, что конструктивно такое количество витков не входят в окно сердечника сечением $S_o = 1.13 \text{ см}^2$. Малый диаметр окна объясняется малой мощностью трансформатора. Таким образом, нужно провести корректирующий расчёт, изменив величину $S_o S_c$.

Марку сердечника оставляем ту же (2421), берем из стандартного ряда магнитопроводов ОЛ 22/30 – 6.5 ($a = 4 \text{ мм}$, $b = 6.5 \text{ мм}$, $d = 22 \text{ мм}$, $D = 30 \text{ мм}$ (рис. 3)), имеющий $S_o S_c = 0.99 \text{ см}^4$.

Число витков на один вольт ЭДС в обмотках трансформатора определяется по выражению [14]:

$$W_0 = \frac{10^4}{4k_\phi B_m f_{\text{вих}} S_c k_c} = \frac{10^4}{4 \cdot 1.11 \cdot 1.35 \cdot 2400 \cdot 0.3 \cdot 0.94} = 3 \text{ витка/вольт}$$

Число витков в первичной обмотке:

$$W_1 = U_1 W_0 = 18 \cdot 3 = 54 \text{ витка}$$

Число витков во вторичной обмотке:

$$W_2 = U_2 W_0 = 10 \cdot 3 = 30 \text{ витков}$$

3.2. Выбор силовых ключей

Выбор силовых ключей основывается исходя из начальных данных ($U_1 = U_{к\max} = 18 \text{ В}$, $I_1 = 0.11 \text{ А}$). По таким параметрам выбираем полевой транзистор (FET транзистор) типа ZVN4206GTA от компании DIODES Inc. со следующими техническими характеристиками [15]:

- Конфигурация и полярность – N;
- Максимальное напряжение сток-исток – 60 В;
- Ток стока номинальный при 25°C, без учета ограничений корпуса – 1 А;
- Сопротивление открытого канала при диапазоне $U_{затв}(\text{ном})$ – 1 Ом;
- Диапазон номинальных напряжений затвора – 5..10 В;
- Максимальное напряжение затвора – 20 В;
- Рассеиваемая мощность – 2 Вт;
- Ёмкость затвора – 100 пФ.

На рис. 4 изображен габаритный чертеж FET транзистора:

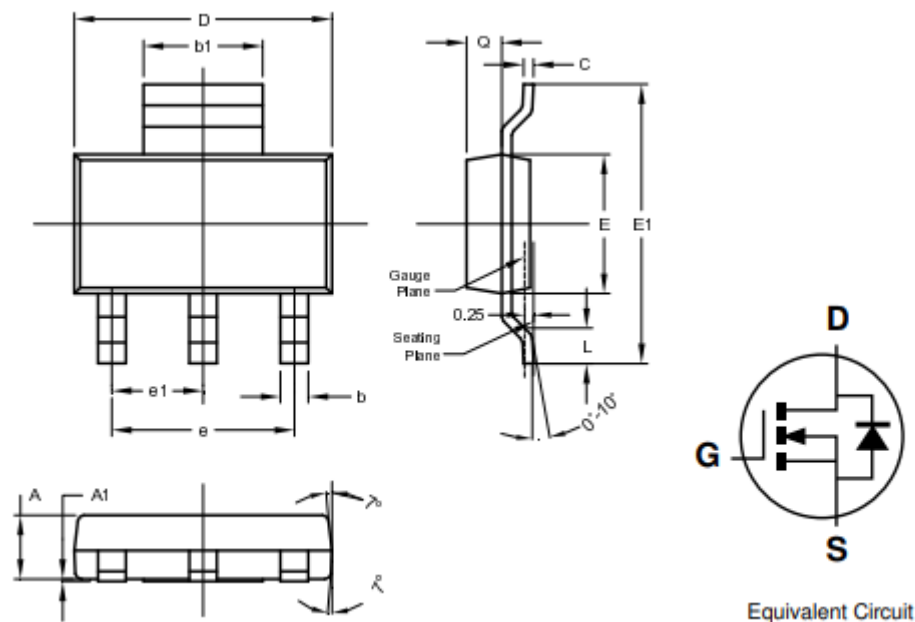


Рисунок 4 – Габаритный чертеж полевого транзистора типа ZVN4206GTA

3.3. Выбор драйверов

Драйверы выбираем исходя из параметров транзистора. По таким параметрам выбираем драйвер типа ISL83202IBZT от компании Intersil со следующими техническими характеристиками [15]:

- Корпус – SO-16;
- Количество нижних каналов – 2;
- Количество верхних каналов – 2;
- Максимальное напряжение смещения – 70 В;
- Максимальный выходной ток нарастания – 1 А;
- Максимальный выходной ток спада – 1 А;
- Рабочая температура - % -55..125 °С.

На рис. 5 изображен габаритный чертеж драйвера:

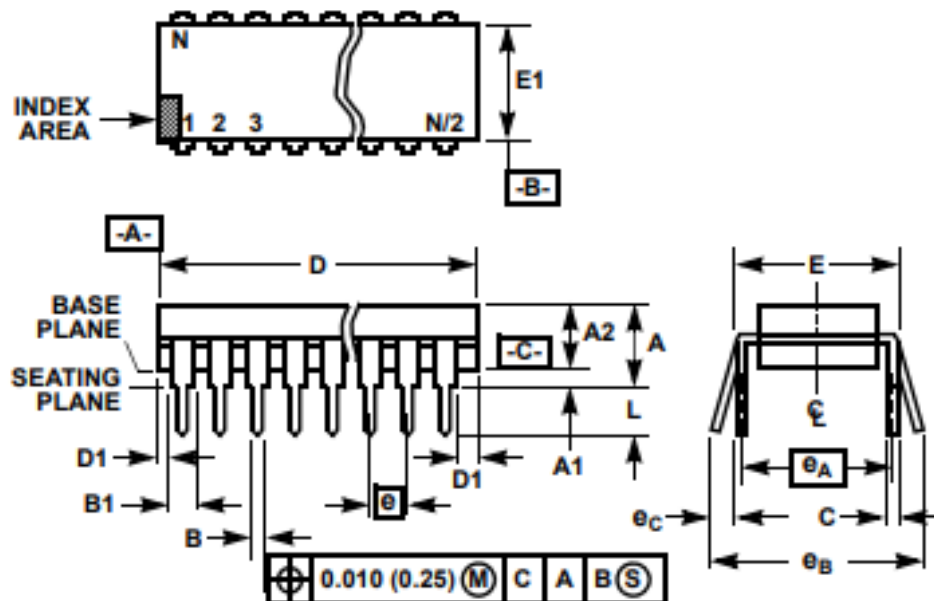


Рисунок 5 – Габаритный чертеж драйвера типа ISL83202IBZT

3.4. Разработка системы управления устройства импульсного намагничивания

Система управления представляет собой совокупность логических элементов. Она состоит из двух схем, одна из которых управляет автономным инвертором напряжения, другая – вольто-добавочным инвертором, подведенный к трансформатору TV.

Система управления автономным инвертором напряжения состоит из кварцевого задающего генератора (КЗГ), делителя частоты (ДЧ) и кольцевой пересчетной схемы (КПС). КЗГ выполнен на двух логических ячейках И-НЕ по схеме мультивибратора. Сигнал с КЗГ поступает на ДЧ, выполненный на программируемых двух счетчиках с коэффициентом деления 640. С ДЧ поступает на фазорасщепитель, выполненный по КПС (счётчик Джонсона). Сам автономный инвертор напряжения управляется через драйверы с выхода КПС.

Система управления вольто-добавочным инвертором из схемы выделения фронтов сигнала управления 400 Гц, инвертора со сбросом, выполненный на двух операционных усилителях и устройства сравнения, реализованного на канале формирования переднего и заднего фронтов. Канал переднего фронта состоит из задающего потенциометра R_7 , компаратора DA7 и схемы заднего фронта на элементах И-НЕ. Канал заднего фронта выполнен аналогично. Далее, на выходе RS-триггера формируется импульс намагничивания, который распределяется по ключам вольтодобавочного инвертора с помощью логической схемы, выполненной на ячейках И-НЕ.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель проекта: проектирование устройства электропривода гиросприбора с импульсным подмагничиванием гистерезисного гидродвигателя для применения в навигационных системах автономных объектов.

Для достижения поставленной цели нужно решить ряд задач:

- Провести обзор литературы по теме синхронного-гистерезисного двигателя и гиросприборам;
- Подобрать оптимальную схему устройства импульсного подмагничивания;
- Рассчитать устройство импульсного подмагничивания;
- Провести сравнительный анализ полученных данных;
- Рассмотреть условия труда при производстве в соответствии с нормативными документами и экологической безопасностью.

В данном разделе дипломной работы рассмотрены вопросы финансового менеджмента. Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию.

4.1. Планирование работ и оценка времени выполнения

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- Определение структуры работ в рамках технического задания;
- Определение участников каждой работы;
- Установление продолжительности работ;
- Построение графика проведения работ.


Этапы проектирования и соответствующие виды выполняемых работ представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – План разработки выполнения этапов проекта.

№ Работ	Наименование работ	Исполнители	Кол. дней
1	Разработка технического задания	Руководитель	1
	Определение объёма работ	Инженер	1
2	Подбор литературы	Руководитель	1
3	Подготовка оборудования	Руководитель	1
		Инженер	1
4	Сбор исходных данных на предприятии	Инженер	10
5	Обзор теории	Инженер	5
6	Расчёт устройства импульсного намагничивания	Инженер	10
7	Проектирование электропривода	Инженер	15
8	Выполнение графической работы	Инженер	5
9	Оформление отчёта и обработка на ПК	Инженер	7
10	Проверка отчёта и чертежей	Руководитель	1
		Инженер	1
11	Итого	Руководитель	4
		Инженер	55

На основе табл. 4.1 строим календарный план-график (табл. 4.2). График строится для макс по длительности работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и за период времени написания ВКР.

Таблица 4.2 – Календарный план-график

№	Наименование работ	Исполнители	Кол. дней	Продолжительности выполнения работ					
				Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	3
1	Разработка технического задания	Руководитель	1						
	Определение объёма работ	Инженер	1						
2	Подбор литературы	Руководитель	1						
3	Подготовка оборудования	Руководитель	1						
		Инженер	1						
4	Сбор исходных данных на предприятии	Инженер	10						
5	Обзор теории	Инженер	5						
6	Расчёт устройства импульсного намагничивания	Инженер	10						
7	Проектирование электропривода	Инженер	15						
8	Выполнение графической работы	Инженер	5						
9	Оформление отчёта и обработка на ПК	Инженер	7						
10	Проверка отчёта и чертежей	Руководитель	1						
		Инженер	1						
	 - Руководитель,  - Инженер								

4.2. Смета затрат на проектирование

При составлении сметы должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

Суммарные затраты на проектирование определяем по выражению:

$$\sum K_{\text{проекта}} = K_{\text{з.пл.}} + K_{\text{соц}} + K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}} \quad (4.1)$$

где $K_{\text{з.пл.}}$ – затраты на заработную плату;

$K_{\text{соц}}$ – затраты на социальные отчисления;

$K_{\text{мат}}$ – материальные затраты;

$K_{\text{ам}}$ – амортизационные затраты;

$K_{\text{пр}}$ – прочие затраты;

$K_{\text{накл}}$ – накладные расходы.

4.2.1. Материальные затраты

Материальные затраты включают в себя стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, такие как бумага, ручка, тетрадь, картридж для принтера, CD-диск и др. Принимаем величину материальных затрат $I_{\text{мат}} = 1000$ руб.

4.2.2. Амортизация вычислительной техники

Основной объём работ по разработке проекта был выполнен на персональном компьютере первоначальной стоимостью 25 тыс. рублей. Амортизация вычисляется по следующей формуле:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{и}}}{T_{\text{кал}}} \cdot \Phi_{\text{кт}} \cdot H_{\text{ф}} \quad (4.2)$$

где $T_{\text{и}}$ – количество отработанных дней на ПК (52 дня);

$T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году (365 дней);

$\Phi_{\text{кт}}$ – первоначальная стоимость ПК (25 тыс. руб.);

$H_{\phi} = 1/T_{\text{сл}}$ – срок полной амортизации (5 лет).

Произведем расчёт амортизации стоимости ПК:

$$K_{\text{ам}} = \frac{52}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 712.3 \text{ руб.}$$

4.2.3. Основная заработная плата исполнителей

Зарплата инженера в месяц:

$$ЗП_{\text{инж}} = ЗП_o \cdot k_1 \cdot k_p \quad (4.3)$$

где $ЗП_o$ – месячный оклад исполнителей (для научного руководителя (профессор) – 30000 руб, для инженера – 17000 руб.);

$k_1 = 1,1$ – коэффициент, учитывающий неотработанное время (отпуск);

$k_p = 1,3$ – районный коэффициент (Томск).

$$ЗП_{\text{инж}} = 17000 \cdot 1.1 \cdot 1.3 = 24310 \text{ руб.}$$

Зарплата руководителя в месяц:

$$ЗП_{\text{рук}} = 30000 \cdot 1.1 \cdot 1.3 = 42900 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата:

$$ЗП_{\phi} = \frac{ЗП_m}{21} \cdot n_{\phi} \quad (4.4)$$

где $ЗП_m$ – месячная зарплата исполнителя;

n_{ϕ} – фактическое количество дней, потраченных на разработку проекта.

Фактическая заработная плата для руководителя:

$$ЗП_{\phi} = \frac{42900}{21} \cdot 4 = 8171.4 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата для инженера:

$$ЗП_{\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 55 = 63699 \text{ руб.}$$

Общие затраты на заработную плату:

$$K_{\text{з.пл.}} = 8171.4 + 63699 = 71840.4 \text{ руб.}$$

4.2.4. Затраты на социальные нужды

В статью расходов «отчисления на социальные нужды» закладывается обязательные отчисления по установленным законодательством нормам. Органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования, от элемента «затраты на оплату труда». Размер отчислений на социальные нужды составляет 30% от фонда заработной платы.

Затраты на социальные нужды рассчитываются по формуле:

$$K_{соц} = 0.3 \cdot K_{з.пл.} \quad (4.5)$$

$$K_{соц} = 0.3 \cdot 71840.4 = 21552.1 \text{ руб.}$$

4.2.5. Прочие затраты

Прочие неучтенные прямые затраты включают в себя все расходы связанные с налоговыми сборами (не предусмотренными в предыдущих статьях), отчисления внебюджетные фонды, платежи по страхованию, оплата услуг связи, представительские расходы, затраты на ремонт и прочее. Принимаем размер прочих затрат как 10% от суммы расходов на материальные затраты, услуги сторонних организаций, амортизации оборудования, затрат на оплату труда, отчисления на социальные нужды.

Прочие затраты рассчитываются по формуле:

$$K_{пр} = 0.1 \cdot (K_{з.пл.} + K_{соц} + K_{мат} + K_{ам}) \quad (4.6)$$

$$K_{пр} = 0.1 \cdot (71840.4 + 21552.1 + 1000 + 712.3) = 9510.5 \text{ руб.}$$

4.2.6. Накладные расходы

Накладные расходы составят 200% от фонда заработной платы. Они включают в себя затраты на хозяйственное обслуживание помещения, обеспечение нормальных условий труда, оплату за энергоносители и другие косвенные затраты.

Накладные расходы рассчитываются по формуле:

$$K_{\text{накл}} = 2 \cdot K_{\text{з.пл.}} \quad (4.7)$$

$$K_{\text{накл}} = 2 \cdot 71840.4 = 143680.8 \text{ руб.}$$

Тогда полная себестоимость проекта составит:

$$\sum K_{\text{проекта}} = 71840.4 + 21552.1 + 1000 + 712.3 + 9510.5 + 143680.8 = 248296.1 \text{ руб.}$$

На основании рассчитанных затрат выпускной квалификационной работы составим таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Смета затрат на проект

Наименование затрат	Сумма, руб
Материальные затраты	1000
Амортизация вычислительной техники	712.3
Основная заработная плата исполнителей	71840.4
Затраты на социальные нужды	21552.1
Прочие расходы	9510.5
Накладные расходы	143690.8
Итого	248296.1

4.3. Оценка технического уровня

Промышленная продукция, которая по показателям технического уровня и качества превосходит лучшие отечественные и зарубежные достижения или соответствует им, определяет технический прогресс, обеспечивает значительное повышение производительности труда, экономию материалов, топлива и электроэнергии, экологически безопасна, удовлетворяет потребности населения страны, и конкурентоспособна на внешнем рынке. Эта продукция должна характеризоваться стабильностью показателей технического уровня и качества, основанной на строгом соблюдении технологической дисциплины и высокой культуре производства. На продукцию высшей категории качества изготовителем должны обеспечиваться повышенные гарантии надежности, безопасности и других важнейших показателей качества.

Промышленная продукция, которая по показателям технического уровня и качества соответствует современным требованиям стандартов (технических условий), экологически безопасна, удовлетворяет потребности народного хозяйства и населения страны, характеризуется стабильностью показателей технического уровня и качества, основанной на строгом соблюдении технологической дисциплины и высокой культуре производства.

Промышленная продукция, которая по показателям технического уровня и качества не соответствует современным требованиям народного хозяйства и населения страны, морально устарела и подлежит модернизации или снятию с производства.

Общей схемой количественного анализа конкурентоспособности, которая может применяться на любом этапе существования изделий, является следующая:

1. Выбор базового образца, аналогичного по назначению и условиям эксплуатации с оцениваемой продукцией.
2. Определение перечня нормативных, технических и экономических параметров, подлежащих исследованию (показать в таблице).

3. Сравнение (по каждой из групп параметров) имеющихся параметров с соответствующими параметрами потребности, необходимыми для заказчика (потребителя). Инструментом сравнения является единичный показатель, представляющий собой отношение величины параметра рассматриваемого изделия к величине этого же параметра, необходимого покупателю.

4. Подсчет группового показателя на основе единичных показателей. Групповой показатель выражает различие между анализируемыми изделиями по всем группам параметров в целом.

Общими и методологическими принципами при соблюдении данной схемы анализа являются учет предельности отдельных элементов потребности, с тем, чтобы при нахождении образца на предельном уровне потребности не делался вывод о большей конкурентоспособности анализируемого изделия с более высокими, чем у образца аналогичными параметрами; необходимость придания количественной оценки тем параметрам, которые не имеют естественной физической меры (например, комфортность изделия), с использованием экспертных методов; необходимость построения весовой базы для технических параметров на основе всесторонних рыночных исследований.

Любое проектирование в идеале должно начинаться с выявления потребностей потенциальных покупателей. После такого анализа становится возможным вычислить единичный параметрический показатель.

$$q = \frac{P}{P_{100}} p,$$

где q - параметрический показатель; P - величина параметра реального изделия; P_{100} - величина параметра гипотетического изделия, удовлетворяющего потребность на 100%; p - вероятность достижения величины параметра; вводится для получения более точного результата с учетом элемента случайности, что позволяет снизить риск осуществления проекта.

Каждому параметрическому показателю по отношению к изделию в целом (т.е. обобщенному удовлетворению потребности) соответствует некий вес d_i , разный для каждого показателя. После вычисления всех единичных показателей становится реальностью вычисление обобщенного (группового показателя), характеризующего соответствие изделия потребности в нем (полезный эффект товара)

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i d_i,$$

где Q - групповой технический показатель (по техническим параметрам); q_i - единичный параметрический показатель по i -му параметру; d_i - вес i -го параметра; n - число параметров, подлежащих рассмотрению.

Показатель конкурентоспособности нашего изделия по отношению к изделию другой фирмы будет равен:

$$k_{ТП} = \frac{Q_H}{Q_K}$$

где $k_{ТП}$ - показатель конкурентоспособности нового изделия по отношению к конкурирующему по техническим параметрам; Q_H , Q_K ~ соответствующие групповые технические показатели нового и конкурирующего изделия.

Данные для оценки конкурентоспособности разрабатываемого новшества приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Оценка технического уровня новшества

Характеристики	Вес показателей	Новшество		Конкурент		Гипотетический образец	
	d_i	P_i	q_i	P_i	q_i	P_{100}	q_{100}
Номинальная мощность, кВт	0,137	2,8	0,933	2,6	0,876	3	1
Масса, кг	0,121	8,3	0,964	8,8	0,909	8	1
Частота вращения, об/мин	0,167	29500	0,975	29000	0,967	30000	1
КПД, %	0,212	75,1	0,927	71	0,876	81	1
Коэффициент мощности, %	0,182	62,3	0,958	59	0,908	65	1
Номинальный ток, А	0,152	0,28	0,932	0,25	0,833	0,3	1
Итого			0,948		0,894		

$$k_{ТП} = \frac{Q_H}{Q_K} = \frac{0,921}{0,869} = 1,0598$$

5. Социальная ответственность

Цель разработки раздела: принятие проектных решений, которые позволили бы исключить несчастные случаи и профессиональные заболевания в производстве, обеспечивающих снижение вредных воздействий на окружающую среду, безопасность в чрезвычайных ситуациях и экономное расходование ресурсов.

Рассмотрение данных вопросов отвечает требованиям международного стандарта ICCSR-26000:2011 к деятельности организаций в области социальной ответственности по тем разделам его модулей, по которым должны быть приняты указанные проектные решения.

5.1. Анализ вредных факторов

Часть технологического процесса исследования и проверки синхронного гистерезисного двигателя основана на работе с двигателем, который является источником повышенного шума, что является вредным фактором производственной среды [23]. Для того чтобы уменьшить влияние шума, можно применять различные меры такие как замена подшипников качения на подшипники скольжения, проверка и своевременная замена смазочных материалов у подшипников, но такие меры слишком затратны и трудоемки. Поэтому также возможно использовать различные ограждения из звукопоглощающих материалов для снижения уровня шума.

Также опасность может представлять повышенный уровень вибрации, который возникает во время работы исследуемого двигателя при нагрузках выше номинальной. Чтобы избежать влияние вибраций на человека, необходимо провести жёсткую фиксацию рабочих механизмов на своих местах с использованием виброгасящих материалов [29].

Следующим вредным фактором является нехватка естественного света. Пониженная контрастность в взаимодействии с плохой освещённостью является наиболее опасным для зрительных органов работника и может привести к травмам при работе с движущимися частями установки [16]. Самое простое решение для снижения риска - покраска отдельных частей установки в различные отчетливо видимые цвета.

Возможные отклонения параметров метеоусловий от нормы. В частности, вредным фактором является пониженная подвижность воздуха, связанная с плохой вентилируемостью лаборатории из-за отсутствия вентиляционной системы [24]. Следствием наличия теплоотдающих при работе элементов установки будет повышенная температура воздуха рабочей зоны, которая плохо отражается на состоянии человека [24]. Для решения этой проблемы нужно установить вентиляционную систему и систему кондиционирования.

5.1.1. Шум

Шум – это один из самых распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом — это работа насосов, вентиляторов и др. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

Для защиты от шума по СанПиН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 и вибрации по СанПиН 2.2.4/2.1.8.566 – 96 предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

Предельно допустимые уровни шума представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Предельно допустимые уровни шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Цех	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Щит управления	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65

5.1.2. Вибрация

Вибрация является одним из наиболее опасных для человеческого организма производственных факторов. Под вибрацией понимают колебание твёрдых тел.

Большое негативное воздействие этот фактор оказывает на отделы центральной нервной системы, желудочно-кишечного тракта и вестибулярного аппарата человека. Длительное воздействие вибрации на организм может привести к развитию профессиональных заболеваний, основным из которых является – виброблезнь, сопровождающаяся головокружением, онемением нижних конечностей и потерей ориентации в пространстве.

Самую большую опасность для организма представляют вибрации частотой 6-9 Гц, так как эти частоты наиболее близки к собственным частотам внутренних органов человека. Совпадение частоты вибрации и внутреннего органа приведёт к резонансному явлению, в результате чего начнётся процесс разрушения. Технические нормы вибрации представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Технические нормы вибрации

Вид вибрации	Среднеквадратичная частота, Гц									
	Логарифмический уровень виброскорости									
	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500
Цех	-	103	100	101	106	112	118	-	-	-

Для виброзащиты применяются средства индивидуальной защиты (СИЗ) для рук, ног и тела оператора. В качестве средства защиты для рук применяются рукавицы и перчатки, вкладыши и прокладки по ГОСТ 12.4.002 "Система стандартов безопасности труда. Средства защиты рук от вибрации. Технические требования и методы испытаний".

Виброзащитная обувь изготавливается в виде сапог, полусапог, в конструкции низа которых используется упруго-демпфирующий материал (ГОСТ 12.4.024 "Система стандартов безопасности труда. Обувь специальная виброзащитная. Общие технические требования").

5.1.3. Недостаток естественного света

Отсутствие или недостаток естественного освещения на рабочем месте может вызвать ухудшение самочувствия и зрения, привести к потере сна и ослаблению здоровья. Специалисты полагают, что причина отрицательного воздействия может заключаться в изменении циркадных ритмов из-за недостатка естественного света. Поэтому следует уделять большее внимание достаточному дневному освещению для укрепления здоровья и морального состояния работников.

На рабочих местах, где трудовая деятельность ведется в условиях отсутствия естественного освещения, необходимо проводить мероприятия, направленные на уменьшение уровня вредности условий труда. В их число входят следующие:

- улучшение условий путем использования искусственного освещения;
- защита временем, то есть сокращение продолжительности пребывания работников в помещении без естественного освещения;
- профилактическое ультрафиолетовое облучение работников. В этом случае источники ультрафиолетового излучения устанавливают рядом с обычными осветительными лампами, за счет чего достигается обогащение обычного искусственного освещения ультрафиолетовым излучением.

При недостатке естественного освещения в помещениях также возможно принятие следующих мер:

- анализ степени загрязненности стекол в светопроемах, их очистка и дальнейшие контрольные измерения коэффициента естественной освещенности (КЕО), который показывает, какая часть наружного освещения попадает на рабочие места производственного помещения;
- при наличии в помещении зон с недостаточным и достаточным уровнем естественного освещения изменение размещения рабочих мест с их переносом в зону с достаточным уровнем естественного освещения;

- косметический ремонт помещения с применением светлых отделочных материалов.

В зависимости от напряжения зрительного аппарата при выполнении работы освещенность на предприятиях делят на восемь разрядов - от наивысшей точности до общего наблюдения за ходом производственного процесса. В таблице 5.3 приведены нормируемые значения КЕО.

Таблица 5.3 – Нормируемые значения КЕО

Характеристика выполняемой зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Значение КЕО в при естественном освещении, %	
			верхнем и комбинированном	боковом
Наивысшей точности	Менее 0,15	I	10	3,5
Очень высокой точности	0,15 ... 0,30	II	7	2,5
Высокой точности	0,3 ... 0,5	III	5	2,0
Средней точности	от 0,5 до 1,0	IV	4	1,5
Малой точности	от 1 до 5	V	3	1,0
«Грубая работа»	Более 5	VI	2	0,5
Работа с самосветящимися материалами и изделиями в горячих цехах		VII		
Общие наблюдения за ходом производственного процесса:		VIII		
постоянное наблюдение	-	VIIIa	1	0,3
периодическое при постоянном пребывании людей в помещении		VIIIб	0,7	0,2
периодическое при периодическом пребывании людей в помещении		VIIIв	0,5	0,1

В данном случае, характеристика выполняемой зрительной работы несет средний характер точности, который имеет IV разряд зрительной работы и имеет значение коэффициента естественного освещения при боковом освещении $КЕО = 1,5 \%$.

5.1.4. Микроклимат

Микроклимат производственных помещений – это комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. Поддержание микроклимата рабочего места в пределах гигиенических норм – важнейшая задача охраны труда.

Помещение цеха характеризуется:

- наличием большого количества металлического оборудования;
- повышенной температурой.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Сезон года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
		По ГОСТ 12.1.005 – 88	По ГОСТ 12.1.005 – 88	По ГОСТ 12.1.005 – 88
Холодный	Средней тяжести	17 – 19	40 – 60	0,3
Тёплый со значительным избытком тепла	Средней тяжести	20 – 22	40 – 60	0,2 – 0,5

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается, в соответствии с СанПиН 2.2.4.548 – 96(1), следующее:

- вентиляция приточно-вытяжная по СНиП 2.04.05 – 91* (28.11.91) установка центробежных вентиляторов. Кратность воздухообмена 1;
- установка систем воздушного отопления, совмещённых с вентиляцией;

Предусмотренные мероприятия обеспечивают параметры микроклимата в соответствии с нормами, представленными в таблице 5.4.

В соответствии с СанПиН 2.2.4.548 – 96(1) значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха устанавливаются, для рабочей зоны производственных помещений, в зависимости от категории тяжести выполняемой работы, величины явного избытка тепла выделяемого в помещении и периода года.

5.2. Анализ опасных факторов

Проведем анализ опасных производственных факторов в вышеописанном технологическом процессе исследования и проверки синхронного гистерезисного двигателя. Основным опасным фактором является возможность поражения человека электрическим током, так как работа производится с рабочими электрическими установками, в частности двигателями. Для снижения уровня опасности проводится заземление электроустановок и полное или частичное ограждение токоведущих частей. Данные операции должны производиться на основании [25 - 28].

Следующая опасность заключается в том, что работа проводится с рабочим двигателем, соответственно вал двигателя находится в движении, что может привести к механическим повреждениям частей тела человека. Однако, благодаря конструкции двигателей, опасность представляют лишь выходные концы валов и места соединений. Для снижения риска устанавливают кожухи или защитные экраны в местах открытых движущихся механических частей.

5.2.1. Электропоражение

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. При разработке коллективных и индивидуальных средств защиты от электропоражения необходимо, согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), рассмотреть следующие вопросы:

- а) обоснование категории помещения по степени опасности поражения электрическим током;
- б) требования к электрооборудованию;
- в) анализ соответствия реального положения на производстве перечисленным требованиям;
- г) мероприятия по устранению обнаруженных несоответствий;
- д) обоснование мероприятий и средств защиты, работающих от поражения электрическим током.

Рассматриваемая лаборатория представляет собой категорию помещений без повышенной опасности. Необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты:

- изоляция проводов и её непрерывный контроль;
- предупредительная сигнализация и блокировка;
- использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов;
- защитное заземление и защитное отключение.

Также, используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

5.2.2. Загорание (пожар)

Пожары - неконтролируемый процесс горения, которые чреваты большими материальными издержками, а часто и человеческими жертвами.

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного производственного помещения. Согласно классификации производств по пожарной опасности (ППБ-03) рассматриваемая лаборатория относится к классу В (обработка или применение твердых сгораемых веществ и материалов, а также жидкостей с температурой выше 120 градусов): электроизоляция, бумага, мебель. Т.е. технологический процесс в лаборатории исключает взрывоопасную зону, имеющиеся вещества могут только гореть. Лаборатория имеет пожароопасную зону класса П-2а. Минимальная допустимая степень защиты оболочек электрических машин для данной пожароопасной зоны обозначается IP44. Использование данной степени защиты – одно из направлений профилактики, оно должно быть установлено на объектах, где воздействие опасных факторов пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Лаборатория оснащена такой системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это другое направление профилактики загораний.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Из пяти таких классов, лаборатории подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок). Согласно [21] на 800 м² защищаемой площади рекомендуется использовать восемь двухкилограммовых порошковых огнетушителей. Для лаборатории достаточно одного двухкилограммового огнетушителя ОП.

5.3. Защита окружающей среды

Работа в лаборатории сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов.

Газообразные отходы, загрязняющие воздух помещения: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения - ЛОС (альдегиды, кетоны), азотистые соединения; бытовая пыль; ЛОС, выделяющиеся в процессе эксплуатации отделочных материалов, лакокрасочных покрытий мебели и др. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани для протирки офисного оборудования и экранов мониторов, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014) [30]: бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681 [31]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть

люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из не адсорбирующего ртуть материала (винипласта).

К сфере защиты ОС и рационального использования природных ресурсов относится и экономия ресурсов, в частности, энергетических. Реальным вкладом здесь может стать экономия электрической и тепловой энергии на территории предприятия. Во-первых, это улучшает экономические показатели деятельности предприятия (уменьшение расходов на электротепловую энергию). Во-вторых, экономия энергии означает уменьшение газа, мазута, угля, сжигаемого в топках котлов ТЭС и электроустановок (котельных) промпредприятий города Томска и области и одновременное уменьшение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Несмотря на кажущуюся малость такого вклада в энергосбережение и в защиту атмосферного воздуха от загрязнения массовое движение в этом направлении, в том числе, в быту, принесет значимый эффект.

5.4. Предотвращение ЧС и устранение их последствий

Наиболее вероятные чрезвычайные ситуации на рассматриваемом рабочем месте в механическом цехе: возникновение пожара и электропоражение.

5.4.1. Загорание (пожар) как источник ЧС

Основные причины пожара: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Согласно [20], пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

К мерам противопожарной защиты относятся: применение пожарных извещателей; средств коллективной и индивидуальной защиты от факторов пожара; системы автоматической пожарной сигнализации; порошковых или углекислотных огнетушителей, два ящика с песком 0,5 м³.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности; разработка схемы действий администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей; организация внештатной пожарной дружины.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефону 01 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь.

5.4.2. Электропоражение как источник ЧС

Современная система электробезопасности обеспечивает защиту от поражения в двух наиболее вероятных и опасных случаях:

- при прямом прикосновении к токоведущим частям электрооборудования;
- при косвенном прикосновении.

Под косвенным прикосновением понимается прикосновение человека к открытым проводящим частям оборудования, на которых в нормальном режиме (исправном состоянии) электроустановки отсутствует электрический потенциал, но при каких-либо неисправностях, вызвавших нарушение изоляции или ее пробой на корпус, на этих частях возможно появление опасного для жизни человека потенциала.

Для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям, согласно [32] п.412. служат изоляция токоведущих частей, применение ограждений и оболочек, установка барьеров, размещение вне зоны досягаемости, устройства защитного отключения (УЗО).

Для защиты от косвенного прикосновения применяются: защитное заземление и защитное зануление [32] п.413.

Даже если при электропоражении работающий внешне сохранил формат нормального самочувствия, он должен быть осмотрен врачом с заключением о состоянии здоровья. Предварительно пострадавший должен быть освобожден от действия электрического тока. Если при этом отключить напряжение быстро невозможно, освобождение от электричества пострадавшего необходимо производить, изолировав себя диэлектрическими перчатками или галошами. При необходимости перерезать провода (каждый в отдельности) инструментом с изолированными ручками. Если есть необходимость (при потере сознания, остановке сердца и т.п.) оказания первой помощи, то до прибытия медработника необходимо начать делать: наружный массаж сердца, искусственное дыхание.

Для предотвращения от поражения электрическим током при прикосновении к корпусам электроустановок, находящихся под напряжением при пробое изоляции или в других случаях, необходимо рассчитать и установить защитное заземление.

Заключение

В выпускной квалификационной работе был спроектирован блок импульсного подмагничивания на основе нулевого инвертора по фазе синхронно-гистерезисного двигателя для применения в составе гиросприбора навигационных систем автономных объектов. Проведен расчет трансформатора. Для магнитопровода была выбрана электротехническая сталь марки 2421 с магнитной индукцией $B_m = 1,35$ Тл. Для работы выбраны силовые ключи (полевые FET транзисторы типа ZVN4206GTA) и драйверы к ним (типа ISL83202IBZT). Также была разработана система управления устройства импульсного намагничивания. В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» был построен календарный план график работ, произведен расчёт сметы затрат на проект. В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены все вредные факторы, которые могут нанести ущерб здоровью человека и окружающей среде, и, также, были описаны способы защиты от них.

Список использованной литературы

1. Орлов И. Н. Гиродвигатели / Ю. В. Арбузов, Б. А. Делекторский, В. Б. Никаноров и др.; Под ред. И. Н. Орлова. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
2. Алпер Н. Я., Данилов-Нитусов Н. Н. Однофазный синхронный гистерезисный двигатель для электропроигрывателей и радиол // Вестник электропромышленности. 1956. - №9. -С. 39-40.
3. Делекторский Б. А., Тарасов В. Н. Управляемый гистерезисный привод. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
4. Бертинов А. И. Электрические машины авиационной автоматики. – М.: Оборонгиз, 1961. – 430 с.
5. Шрейнер Р. Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А. А. Ефимов.; Под общей ред. Р. Т. Шрейнера. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.
6. Гарганеев А. Г. Режим скольжения в гистерезисном электроприводе // Изв. вузов. Электромеханика. 1989. - №5. – С. 95 – 98.
7. Гарганеев А. Г. Мехатронные системы с синхронно-гистерезисными двигателями: монография / С. В. Брованов, С. А. Харитонов, А. Г. Гарганеев; Томский политехнический университет. – Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 227 с.
8. Пельпор Д. С. Гироскопические приборы и автопилоты. – Изд-во «Машиностроение», 1964.
9. Сломьянский Г. А., Прядилов Ю. Н. Поплавковые гироскопы и их применение. – Оборонгиз, 1958.
10. Ишлинский А. Ю. Механика гироскопических систем. – АН СССР, 1963.
11. Венгеров В. А., Селезнев С. Р. Дрейф гироскопа от собственной разбалансировки и внешних вибраций. – Изд-во АН СССР, «Механика и машиностроение», 1962, №3.
12. Голахен Г. Гироскопы, основанные на новых принципах. – «Вопросы ракетной техники», 1960, №1.

13. Орлов И.Н. Проектирование гироскопических электродвигателей / Б. А. Делекторский, Н. З. Мастяев, И. Н. Орлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 252 с.
14. Мишуров В. С. Устройства преобразовательной техники: Методические указания по выполнению курсового проекта. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. – 127 с.
15. Каталог продукции [Электронный курс]. – Режим доступа: <https://www.compel.ru/catalog>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 20.05.18).
16. ГОСТ 12.0.003-74 (СТ СЭВ 790-77). «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
17. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарные гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
18. ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности».
19. Правила устройства электроустановок, ПУЭ, утвержденные Министерством энергетики России от 08.07.2002, №204, Глава 1.7.
20. ГОСТ 12.1.004-91, СС5Т «Пожарная безопасность. Общие требования».
21. СП 9.13130.2009 «Техника Пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации».
22. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – 6е изд., переработанное и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 824 с.
23. СНиП П-12-77. «Защита от шума».
24. СНиП 2.04. 05-91. «Отопление, вентиляция и кондиционирование»
25. ГОСТ 12.1.019 -79 (с изм. №1) ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
26. ГОСТ 12.0.004–90 ССБТ. «Обучение работающих безопасности труда».
27. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. «Защитное заземление, зануление» .

28. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов».

29. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. «Вибрационная безопасность. Общие требования».

30. Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014) «Об организации сбора, вывоза, утилизации, и переработки бытовых и промышленных».

31. Постановление Правительства РФ от 03.09.2010 №681 «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств».

32. ГОСТ Р 50571.3-94 «Электроустановки зданий. Часть 4. Защита от поражения электрическим током».

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Принципиальная схема устройства импульсного намагничивания

